INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Septiembre 2022 · nº 552 · 6,50 €

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



LA ÚLTIMA FRONTERA DE LAS VOYAGER

La misión más longeva de la historia se adentra en el espacio interestelar

CAMBIO CLIMÁTICO

Nuevos enfoques para frenar la desertificación

COMPUTACIÓN

Ordenadores que disiparían mucho menos calor

BIOLOGÍA

Cómo las aves perciben su canto

SUMARIO

ARTÍCULOS

16 EXPLORACIÓN ESPACIAL
El increíble viaje de las Voyager

30 MEDIOAMBIENTE
Entender la desertificación para frenarla

39 EDUCACIÓN
Desinformación climática en la escuela

55 EVOLUCIÓN
Misterios del corazón y de la cabeza

61 COMPORTAMIENTO ANIMAL
Así escuchan las aves su canto

69 CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN
Computación reversible

SECCIONES

3 APUNTES
Detectar el alzhéimer a través de la retina | Aguijón a propulsión | Mutaciones cuánticas | Parásitos intestinales | Chips con cilios artificiales | El linaje de los helechos arborescentes | Ciclos solares | Hielo resonante | Diluvios tras los fuegos |

15 LA IMAGEN DEL MES
Vórtices marinos

49 FILOSOFÍA DE LA CIENCIA
Por qué la inteligencia artificial no puede querer nada

53 FORO CIENTÍFICO
La protección de la biodiversidad no es una causa perdida

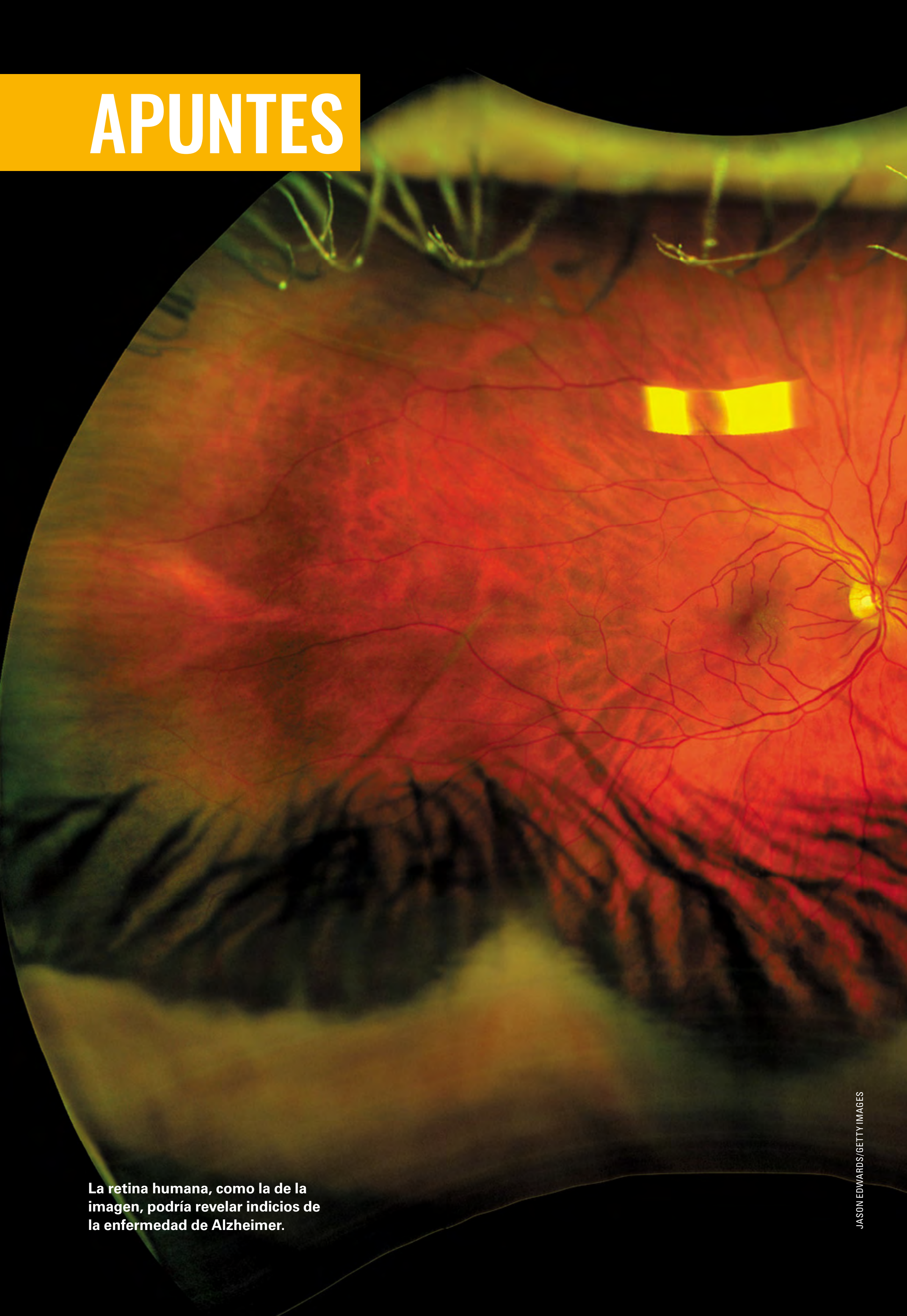
73 CURIOSIDADES DE LA FÍSICA
Hacer un pleno

76 JUEGOS MATEMÁTICOS
La delicadeza de los números primos

81 LIBROS
Los ecos del proyecto Manhattan

IMAGEN DE PORTADA: NASA/JPL-CALTECH

APUNTES



La retina humana, como la de la imagen, podría revelar indicios de la enfermedad de Alzheimer.

JASON EDWARDS/GETTY IMAGES

MEDICINA

DETECTAR EL ALZHÉIMER A TRAVÉS DE LA RETINA

Ciertas pruebas oculares facilitarían el diagnóstico de la enfermedad

En el embrión, una parte del encéfalo incipiente se ramifica y conforma la retina, una lámina de tejido que tapiza la parte posterior del globo ocular. Esto convierte la retina, compuesta por varias capas de neuronas, en parte del sistema nervioso central. A medida que más y más pruebas indican que algunas alteraciones cerebrales se pueden manifestar a través de ella, los especialistas están dedicando más atención a su posible uso como indicadora de los signos iniciales del alzhéimer, una enfermedad neurodegenerativa incurable que afecta a más de 800.000 personas en España y a 10 millones en Europa.

Décadas atrás, el alzhéimer solo se podía diagnosticar en la autopsia, tras la muerte del paciente; pero, gracias al progreso científico, desde inicios del milenio es posible detectar con precisión los signos de la enfermedad —y empezar a investigar tratamientos— años antes de que aparezcan los primeros síntomas. Hoy, la obtención de imágenes del cerebro mediante tomografía por emisión de positrones (TEP) y el análisis del líquido cefalorraquídeo (el líquido que envuelve el encéfalo y la médula espinal) facilitan el diagnóstico del alzhéimer en sus etapas iniciales.

«Ha habido enormes avances en la capacidad de detección precoz», afirma Peter J. Snyder, neuropsicólogo y neurocientífico en la Universidad de Rhode Island. Pero esos métodos de diagnóstico no siempre están disponibles y son costosos e invasivos. La TEP exige la inyección de una sustancia marcadora radiactiva en el torrente sanguíneo, y el líquido cefalorraquídeo debe extraerse mediante la punción con una aguja entre las vértebras de la espalda. «Tenemos que priorizar el diagnóstico de las personas con alto riesgo mediante herramientas de cribado que sean económicas, sencillas y no invasivas», señala Snyder. La retina resulta especialmente interesante, añade, porque presenta una vinculación estrecha con el tejido cerebral y puede examinarse a través de la pupila con métodos corrientes en la consulta del oftalmólogo.

Una estrategia para el cribado retiniano consiste en buscar indicios del amiloide beta, el péptido que se agrega en forma de placas dañinas en el cerebro de los pacientes de alzhéimer. Los estudios apuntan a que este fragmento proteico se acumula también en la retina, y existen indicios de que podría ser detectable en su seno antes de la manifestación de los primeros síntomas.

En 2014, Robert Vince y Swati More, del Centro de Diseño Farmacológico de la Universidad de Minnesota, describieron por primera vez el uso de un método que denominaron obtención de imágenes hiperespectrales. Consistía en capturar una imagen a numerosas longitudes de onda para localizar los agregados de amiloide beta en retinas de ratón. A continuación, confirmaron la presencia de esos agregados en el cerebro de los roedores en fases más avanzadas de la enfermedad. Desde esa primera descripción, los equipos de ambos científicos han descubierto que los agregados también servirían como indicador precoz en el ojo humano.

El equipo ha concedido la licencia de la técnica a una empresa de diagnóstico por imágenes de Canadá, RetiSpec, que la combina con un algoritmo de aprendizaje automático que localiza con precisión los agregados amiloideos en las imágenes hiperespectrales. Investigadores de numerosos centros de América del Norte están llevando a cabo ensayos clínicos para examinar la eficacia de la técnica.

Los datos preliminares de esos estudios, presentados en una conferencia el pasado noviembre, procedían de 108 participantes con riesgo de padecer alzhéimer, con alzhéimer presintomático o con un deterioro cognitivo leve (que puede ser un signo inicial de enfermedad neurodegenerativa). Al comparar las pruebas de cribado retiniano con los resultados de la TEP y del análisis del líquido cefalorraquídeo, los investigadores comprobaron que la técnica identificaba correctamente a

las personas con amiloide cerebral en el 86 por ciento de los casos, y descartaba con acierto a los no afectados el 80 por ciento de las veces. En opinión de Sharon Cohen, directora médica del Programa de Memoria de Toronto y coordinadora del estudio, los resultados son alentadores, pero matiza que se precisan más datos antes de que se apruebe su uso como instrumento de diagnóstico. «Aunque creo que ese día llegará.»

Otros investigadores han identificado también amiloide en las retinas de personas sin signos de deterioro cognitivo pero cuyas imágenes de TEP mostraban la presencia de placas amiloideas. El neurocientífico Robert Rissman, de la Universidad de California en San Diego, y sus colaboradores están examinando la retina de los participantes en un gran ensayo en curso donde se investiga un fármaco experimental contra el alzhéimer. Antes y después de iniciar el tratamiento, los investigadores miden el amiloide retiniano; primero lo hicieron en un pequeño estudio de viabilidad con ocho participantes, y ahora lo están midiendo en un mayor número de pacientes. Estos datos podrían arrojar luz sobre la evolución del amiloide en la retina y demostrar si el tratamiento reduce su concentración, explica Rissman.

Asimismo, se están investigando otros signos retinianos del alzhéimer inicial. En un estudio publicado en *JAMA Ophthalmology* a principios de este año, sus autores describieron que el espesor de la retina se asociaba con ciertos aspectos del deterioro cognitivo. Y el equipo de Snyder ha estado explorando los cambios progresivos en la anatomía de ese tejido, como la regresión de ciertas regiones; los datos preliminares parecen indicar que esos cambios se relacionan con la acumulación de amiloide en el cerebro. Snyder y sus colaboradores analizan ahora esos y otros biomarcadores retinianos, como las alteraciones en los vasos sanguíneos, en el ensayo longitudinal Estudio para un Atlas de Imágenes Retinianas del Alzhéimer (ARIAS, por sus siglas en inglés).

Si bien el diagnóstico retiniano de la enfermedad se ha abordado con distintos enfoques, Rissman afirma que de momento no se ha demostrado ninguno y advierte de que quedan preguntas sin respuesta, como saber si los agregados que se detectan son realmente de amiloide. Snyder destaca que se sigue debatiendo cuál es el mejor modo de reconocer la sustancia en la retina, a lo que se suma el hecho de que los estudios por imágenes de esos agregados se han saldado con resultados variopintos en distintos centros de investigación.

Pese a lo anterior, Cohen asegura que, «si bien los trabajos de diferentes laboratorios siempre son bienvenidos para confirmar los datos [...], ya hay suficientes pruebas de que el amiloide se acumula en la retina y esto no debería ponerse en tela de juicio.»

La detección precoz y el diagnóstico certero son claves para prestar a los enfermos la atención y el itinerario terapéutico adecuados, por lo que herramientas como el estudio por imágenes de la retina podrían ser de ayuda tanto para el paciente como para el médico en ese periplo, afirma Rebecca Edelmayer, directora de promoción científica de la Asociación de EE.UU. para el Alzheimer. Aunque todavía no se conocen todas las posibilidades que puede brindar el diagnóstico por la imagen de la retina, «vivimos un momento realmente interesante», concluye.

Diana Kwon

BIOLOGÍA

AGUIJÓN A PROPULSIÓN

Un estudio ahonda en los extraordinarios aguijones de los animales marinos

Las medusas, las anémonas y los corales, que conforman el grupo de los cnidarios, disparan dardos con veneno urticante a velocidades de relámpago por medio de diminutas cápsulas presurizadas. El mecanismo exacto del proceso, que tiene lugar en unos orgánulos celulares especiales llamados nematocistos, no se conocía con certeza. Ahora, un equipo encabezado por Matt Gibson y Ahmet Karabulut, del Instituto Stowers de Investigaciones Médi-

cas de Kansas City, ha empleado una avanzada técnica de imágenes para examinar con sumo detalle el accionamiento del nematocisto. Según creen, descubrir la biofísica de la que califican como «una de las micromáquinas biológicas más refinadas de la naturaleza» podría inspirar el diseño de minúsculos inoculadores de fármacos.

La casualidad ha contribuido al descubrimiento, que se ha dado a conocer en *Nature Communications*: Karabulut se percató de que una sustancia empleada en la preparación microscópica de las células urticantes de las anémonas de mar también provocaba el disparo de los nematocistos y los fijaba, es decir, conservaba su estructura celular, en diversas etapas del proceso. Por medio de la microscopía de fluorescencia de muy alta resolución y la microscopía electrónica, observaron con todo lujo de detalles la secuencia de sucesos. En estos intervienen un tubo rígido y un filamento flexible en forma de látigo, que permanece enroscado alrededor del primero en el interior del nematocisto.


Anémona de mar

ROBERT AGUILAR/CENTRO SMITHSONIANO DE INVESTIGACIONES AMBIENTALES (CC BY 2.0)

La célula carece del espacio suficiente para dar cabida a un mecanismo elástico que impulse el aguijón, «así que ha ideado otra estrategia», explica Karabulut. Tanto el tubo como el filamento permanecen invaginados y perfectamente plegados en el interior del orgánulo minúsculo. Cuando el nematocisto se dispara, el tubo sale proyectado primero y gira hacia la derecha. A continuación, el filamento se desenrolla y se desplaza sobre el tubo girando también hacia la derecha. Ese giro orienta hacia afuera los diminutos garfios que lo recubren, que hasta ese momento apuntaban hacia adentro, y que son los encargados de inyectar las toxinas a la infortunada presa.

Poder ver el proceso bifásico de disparo supone «un gran avance en el conocimiento de la mecánica de evaginación del orgánulo», opina Leslie Babonis, bióloga evolutiva de la Universidad Cornell y ajena al estudio.

En el futuro tal vez sea posible diseñar y crear a medida cnidocitos para que inyecten fármacos donde se quiera. «No creo que sea descabellado pensar en aplicaciones médicas o terapéuticas», concluye Babonis.

Viviane Callier

QUÍMICA TEÓRICA

MUTACIONES CUÁNTICAS

El efecto túnel podría modificar el ADN

APERSON/INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DEL GENOMA HUMANO DE EE.UU./WIKIMEDIA COMMONS, DOMINIO PÚBLICO

Muchos biólogos suponen que los fenómenos cuánticos desempeñan un papel insignificante en el interior de las células. Sin embargo, según un reciente análisis teórico de los enlaces que mantienen unido el ADN, esos efectos podrían ser bastante más frecuentes de lo que se sospechaba y constituir una importante fuente de mutaciones genéticas.

Un equipo dirigido por Louie Slocombe, de la Universidad de Surrey, se ha centrado en las bases nitrogenadas presentes en los «peldaños» que conectan la doble cadena de la molécula de ADN, así como en los puentes de hidrógeno (formados mediante un protón) que enlazan las dos partes de esos peldaños. Su modelo teórico incluye los efectos cuánticos que permiten que un protón unido a la base citosina de una hebra experimente de forma espontánea un «efecto túnel» y se enganche a la base guanina de la otra.

Ese par de bases alterado, conocido como tautómero, puede recuperar enseguida su configuración original. Pero si el protón no regresa a su posición antes de que se separen las dos cadenas de ADN (el primer paso del proceso de replicación), la citosina podría unirse a una base distinta, la adenina, en vez de a la guanina. Y ese apareamiento anómalo crearía una mutación.

Desde la década de 1950, cuando se descubrió la estructura de la molécula de ADN, se sabe que (en teoría) los pares de bases pueden adoptar formas tautoméricas. No obstante, se creía que el efecto túnel tendría poca relevancia a la hora de generar mutaciones, debido a la duración extraordinariamente corta de esos estados físicos.

Sin embargo, según el modelo que describen los investigadores en *Communications Physics*, el proceso cuántico ocurre tan a menudo que, en un momento dado, puede haber cientos de miles de tautómeros en el genoma de una célula. Así pues, aunque esas estructuras sean efímeras, surgen con tanta frecuencia que podrían convertirse en una gran fuente de mutaciones. El modelo indica que la inestabilidad cuántica «tal vez desempeñe un papel mucho más importante en las mutaciones del ADN de lo que se ha propuesto hasta ahora», escriben los autores. El equipo se pregunta por el modo en que los mecanismos de reparación específicos logran subsanar esos errores cuánticos, dado que la cantidad de tautómeros predicha es miles de veces mayor que el número total de mutaciones que se produce en cada generación humana.

El trabajo quizás «allane el camino para investigar diversos procesos de efecto túnel en el ADN y en la membrana celular que podrían ser fundamentales en biología molecular», comenta Gizem Çelebi Torabfam, científica del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nanotecnológicas de la Universidad Sabancı, en Estambul, quien ha estudiado el efecto túnel, pero no participó en el proyecto. «Además, deberíamos considerar la transferencia ultrarrápida de protones entre dos bases de ADN en la patogenia de enfermedades comunes.»

Lars Fischer y Gary Stix

ECOLOGÍA

PARÁSITOS INTESTINALES



THOMAS FUCHS

Los «códigos de barras genéticos» ayudan a entender cómo se propagan las lombrices entre los herbívoros

Si una cabra y un hipopótamo van a beber a un abrevadero de la sabana, quizás acaben compartiendo mucho más que un simple trago. Los parásitos intestinales, transmitidos a través de la comida y el agua, pueden causar daños que van desde un retraso del crecimiento hasta la inanición y la muerte. Para predecir cómo se propagan esas lombrices en lugares como el centro de Kenia, donde confluyen cada vez más los herbívoros salvajes y los domésticos, los científicos tratan de comprender mejor qué parásitos viven en cada especie y por qué.

Un estudio publicado en *Proceedings of the Royal Society B* muestra que los parásitos intestinales son selectivos en cuanto a sus anfitriones: las especies de parásitos relacionadas entre sí tienden a concentrarse en animales con tripas similares. Los investigadores realizaron un análisis químico de 550 muestras fecales de 17 especies herbívoras e identificaron fragmentos de ADN de los parásitos (los deno-

minados códigos de barras genéticos) que les permitieron catalogar las poblaciones de nematodos susceptibles de alojarse en los intestinos de los animales.

Las aproximadamente 80 clases de lombrices que hallaron parecían repartirse entre dos tipos distintos de aparatos digestivos: algunas se inclinaban por los estómagos simples, mientras que otras preferían aquellos compuestos por varios compartimentos, como los de las vacas y los camellos. Incluso las especies no emparentadas, como los elefantes y los burros (que tienen poco en común, más allá de ser monogástricos), presentaban parásitos genéticamente similares, lo cual sugiere que esos mamíferos podrían infectarse unos a otros.

Saber qué lombrices viven en qué animales ayuda a los ganaderos y a los expertos en conservación a controlar la propagación de los parásitos. En Kenia, las estaciones secas son cada vez más largas, lo que ha llevado a un buen número de granjeros a cambiar el ganado vacuno por animales que toleran mejor las sequías, como los camellos. Aunque, desde el punto de vista genético, los camellos son muy diferentes de sus nuevos vecinos de la sabana, parece que comparten parásitos con multitud de especies salvajes y domésticas, sobre todo con las vacas. Y el 90 por ciento de los camellos analizados tenían parásitos, cuando la media en otras especies poligástricas ronda el 65 por ciento.

«No sabíamos que hubiera tantos camellos infectados, ni que compartieran parásitos con tantos animales salvajes», admite Georgia Titcomb, ecóloga experta en enfermedades de la Universidad de California en Santa Bárbara y primera autora del artículo. A partir de estos resultados, se ha decidido desparasitar a los camellos de la zona estudiada para proteger a animales como las jirafas, cuya población está disminuyendo.

Las lombrices intestinales suelen identificarse mediante procesos lentos y costosos, que implican sacrificar animales o examinar las heces al microscopio en busca de huevos. Sin los códigos de barras genéticos, Titcomb y su equipo no habrían obtenido una imagen tan completa de la población de parásitos.

«Creo que son las herramientas perfectas para abordar este tipo de cuestiones, como qué factores determinan la composición de las comunidades de parásitos», señala Sebastién Calvignac-Spencer, ecólogo de enfermedades del Instituto Robert Koch de Berlín ajeno al estudio, pero que emplea los códigos de barras genéticos para estudiar los virus de los mamíferos. Ambos investigadores confían en que este método se popularice entre los parasitólogos.

Sasha Warren

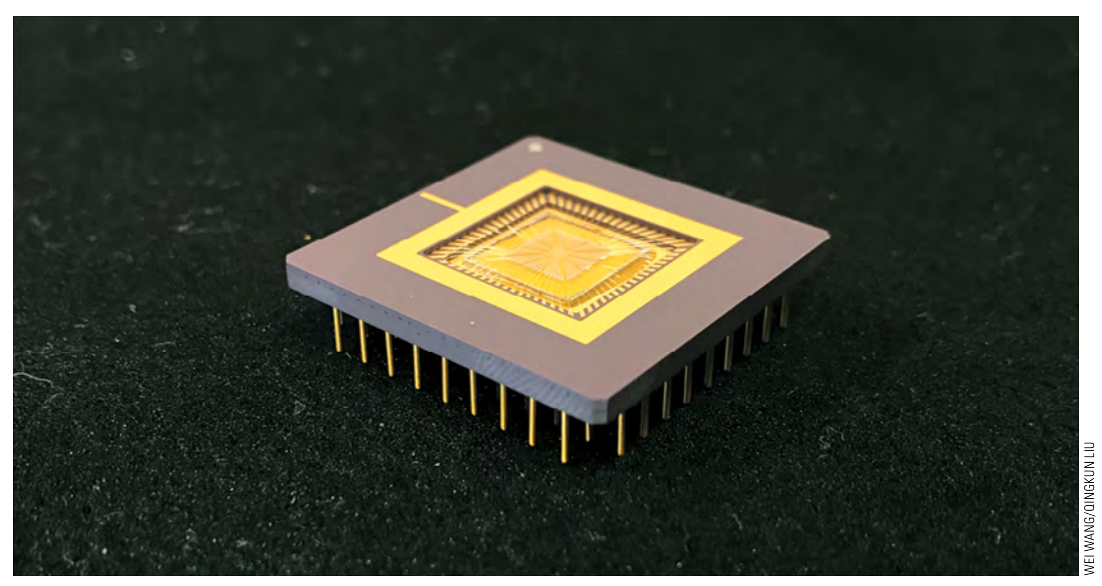
TECNOLOGÍA

CHIPS CON CILIOS ARTIFICIALES

Un nuevo chip recubierto de cilios podría revolucionar el diagnóstico mediante equipos portátiles

El diminuto movimiento de un cilio, una especie de pelo celular microscópico, apenas provoca un cambio en su poseedor. Pero, si se mueven todas juntas, estas estructuras logran auténticas hazañas biológicas dentro del organismo. Los cilios eliminan los patógenos inhalados que han llegado al aparato respiratorio, transportan el líquido cefalorraquídeo a través de las cavidades cerebrales, empujan los óvulos del ovario al útero y drenan la mucosidad desde el oído medio hacia la cavidad nasal. Ejercen dichas funciones gracias a un control microfluídico preciso sobre los líquidos vitales del organismo. Para entender mejor cómo funcionan, los científicos llevan intentando imitarlos desde hace años.

Ahora se está más cerca que nunca de conseguirlo. Un equipo compuesto por varios investigadores ha creado un chip cubierto de cilios artificiales. Con él pueden controlar con precisión los minúsculos patrones de flujo de los fluidos. Los desarrolladores esperan que esta técnica se convierta en la base de nuevos dispositivos portátiles de diagnóstico. En la actualidad, numerosas


WEI WANG/QINGKUN LIU

Chip recubierto con cientos de cilios artificiales.

pruebas diagnósticas de laboratorio consumen tiempo y recursos y precisan de la intervención humana. Un chip cubierto de cilios permitiría realizar esas pruebas de una forma más sencilla, barata y eficiente. Además, las muestras que se necesitarían de sangre, orina u otro material podrían ser mucho menores.

Los humanos hemos logrado espectaculares hazañas tecnológicas a gran escala, pero «no estamos al mismo nivel en lo referente al diseño de máquinas en miniatura», señala Itai Cohen, físico de la Universidad Cornell y principal autor del estudio, publicado en *Nature*, en el que se describe el chip con cilios. Anteriormente, se había intentado crear cilios artificiales que funcionaran gracias a la presión, la luz, la electricidad e incluso imanes. Pero quedaba por resolver un gran obstáculo: el diseño de minúsculos actuadores (las piezas que activan el movimiento de una máquina) que pudieran controlarse individualmente o en pequeños grupos, en lugar de todos a la vez.

Los investigadores resolvieron el problema inspirándose en algunos aspectos de su trabajo previo. En agosto de 2020, el Libro Guinness de los Récords reconoció a Cohen y a su equipo por diseñar el robot andante más pequeño del mundo. Su máquina, cuyo tamaño era tan solo de una fracción de un milímetro, caminaba sobre cuatro patas flexibles. De forma parecida, los nuevos cilios artificiales están hechos de una película flexible de grosor nanométrico que responde al control eléctrico. Cada cilio mide una veinteava parte de un milímetro de largo (menos de la mitad de lo que mide un ácaro) y diez nanómetros de grosor (más delgado que el más pequeño de los orgánulos celulares). Uno de sus lados está recubierto con una tira de platino, y el otro, con una película de titanio.

La clave para controlar eléctricamente estos cilios artificiales reside en su composición metálica. Al aplicar un pequeño voltaje positivo a través de un cilio, se desencadena una reacción química; cuando este entra en contacto con una gota de un fluido de prueba, el platino electrificado rompe las moléculas de agua del fluido. Esto libera los átomos de oxígeno, que serán absorbidos por la superficie de platino. El oxígeno captado alarga la tira y hace que se doble en una dirección. Cuando se invierte el voltaje (pasa de positivo a negativo), el oxígeno sale del platino y el cilio recupera la forma original. Así lo explica Cohen: «Al hacer oscilar el voltaje, la tira se puede doblar y desdoblar a voluntad, lo que genera ondas con las que se impulsará el movimiento [del fluido de prueba]». Mientras tanto, la película de titanio, eléctricamente inerte, estabiliza la estructura.

El siguiente paso era crear una superficie con miles de cilios artificiales. Al doblarse y desdoblarse una tras otra, estas finas tiras pueden impulsar una cantidad microscópica de fluido en una dirección determinada. Pero, para conseguir que una gota fluyera siguiendo un patrón más complejo, el equipo tuvo que dividir la superficie del chip en grupos de cilios que se pudieran controlar por separado. En colaboración con investigadores de la Universidad de Cambridge, el equipo de Cornell ideó virtualmente un sistema de control para simular en tres dimensiones el

movimiento de una gotita a través de un chip recubierto de cilios.

Después de analizar todos los aspectos teóricos mediante esas simulaciones, construyeron el dispositivo físico. Su chip, de un centímetro de ancho, está recubierto por cientos de diminutas bandas de platino y titanio, y está dividido en 64 unidades ciliares, cada una compuesta por ocho cilios. Dado que cada unidad puede controlarse de forma independiente, es posible programarla por separado y después coordinarla con el resto para mover el fluido en la dirección deseada. Trabajando juntas, las unidades podrían crear un sinfín de patrones de flujo.

El primer dispositivo creado por el equipo puede dirigir gotas siguiendo patrones específicos, pero no es tan eficiente como les hubiera gustado. Ya están planificando la siguiente generación de chips con cilios con más de una «articulación». Tendrán más capacidad de flexión, «y el flujo del fluido será mucho más eficiente», señala Cohen.

El estudio «muestra de manera elegante que, mediante señales eléctricas, es posible controlar por separado conjuntos de cilios artificiales para realizar operaciones complejas y programables con fluidos», comenta Zuankai Wang, experto en microfluidos de la Universidad de la Ciudad de Hong Kong, quien no participó en el estudio. «Esperamos que en los años venideros se puedan producir en masa dispositivos de diagnóstico portátiles de bajo coste.»

Dado que la nueva técnica imita las estructuras biológicas, tiene mucho sentido utilizarla en medicina. Facilitaría, por ejemplo, el análisis de una muestra de agua, sangre u orina en busca de contaminantes o marcadores de una enfermedad. El usuario colocaría una gotita de sangre u orina en el chip y los cilios artificiales moverían de un lugar a otro la muestra (junto a cualquier compuesto o patógeno que contuviera), lo que haría que se mezclara con los reactivos. Una serie de biosensores integrados en el chip medirían los productos de estas reacciones químicas. Luego harían que los cilios manipulasen todavía más el flujo del líquido, lo que permitiría realizar pruebas adicionales para confirmar los resultados. «De esta forma, todos los experimentos químicos que ahora precisan de un laboratorio se llevarían a cabo en un chip de un centímetro», explica Cohen. «El chip también podría alimentarse mediante diminutos paneles solares insertados en él.» Un dispositivo autosuficiente como este sería ideal.

«Es increíble cómo han combinado la microelectrónica con la mecánica de fluidos», comenta Manoj Chaudhury, científico de materiales de la Universidad de Lehigh, ajeno al estudio. Según él, han resuelto un problema esencial, pero todavía queda mucho trabajo por hacer. «Cuando se diseña un sistema de reactores para analizar una gota de sangre, debe haber estaciones locales donde a veces es necesario calentar o enfriar la muestra. Por lo que sería muy interesante ver cómo integran todos estos aspectos en un microrreactor.»

Saugat Bolakhe

BIOLOGÍA

EL LINAJE DE LOS HELECHOS ARBORESCENTES

La secuenciación del genoma arroja pistas sobre su origen y evolución

Los helechos son peculiares. Verdes y foliáceos como las demás plantas de los bosques y las selvas, se reproducen en cambio como los hongos, liberando nubes de esporas. Y, a diferencia de la mayoría de las plantas superiores, que se reproducen con semillas, muchos no precisan de pareja para consumar la fecundación. Estudios recientes calculan que divergieron de ellas hace unos 400 millones de años.

Otro atributo distintivo de los helechos, o pteridófitas, es su enorme genoma, que, pese a esa fisiología singular y sus vínculos con las

plantas superiores, apenas había sido estudiado. Hasta hace poco solo se habían secuenciado por completo dos genomas relativamente pequeños de pteridófitas, en contraste con las más de doscientas plantas con flores, o angiospermas. Eso convierte en noticia el que se haya secuenciado por primera vez el genoma de un helecho arborescente, *Alsophila (Cyathea) spinulosa*, un avance que ofrece pistas sobre cómo acumularon semejante cantidad de genes las plantas de su clase.

«Si uno quiere conocer el origen de las semillas y de las flores, los helechos constituyen una referencia de suma importancia. Pero lo que quiero saber de veras es por qué su genoma es tan grande», afirma Fay-Wei Li, pteridólogo del Instituto Boyce Thompson de la Universidad Cornell y uno de los autores del nuevo estudio, publicado en *Nature Plants*.

El equipo de Li ha descubierto que *A. spinulosa* acoge más de 6000 millones de pares de bases de ADN, mil millones más que el promedio de las angiospermas (en comparación, el genoma humano se compone de 3000 millones). El novedoso análisis indica que, hace más 100 millones de años, el antepasado de este helecho duplicó su genoma durante la replicación, un error frecuente en el reino vegetal, comenta Li.

Lo que no está tan claro es por qué los helechos arborescentes han conservado todo ese material genético; la mayoría de las plantas angiospermas que experimentan duplicaciones acaban recuperando el tamaño original del genoma. Este helecho habría acaparado los cromosomas, explica Li: «La llamo hipótesis de Marie Kondo: los cromosomas "aportan felicidad" a los helechos, pero no a las plantas con semilla.» En toda planta que se reproduzca asexualmente, el genoma grande puede dar nuevas oportunidades de mutaciones beneficiosas al tiempo que amortigua el efecto de las indeseables. Los helechos también son plantas longevas, así que evolucionan con cierta lentitud, lo que podría haber facilitado la retención de material genético.

Gracias a la secuenciación del genoma entero, se han localizado también los genes responsables del peculiar pseudotronco (estípite) de este helecho, lo cual ofrece valiosas pistas sobre la evolución de los rasgos básicos de las plantas dotadas de tallos, opina Jan de Vries, biólogo evolutivo vegetal de la Universidad de Gotinga que no ha participado en el estudio. «La evolución es ingeniosa. Averiguar los programas moleculares que han prosperado nos permite saber qué es factible desde el punto de vista biológico y dónde se hallan los límites. Y con ese conocimiento, podemos comenzar a jugar en el campo de la biología sintética.»

Fionna M. D. Samuels


NEIL MCALLISTER/ALAMY STOCK PHOTO

El helecho arborescente *Alsophila spinulosa*.

CICLOS SOLARES

Las manchas oscuras del Sol se rigen por ciclos de 11 años... y también de 88, 200 y 2400 años

La superficie del Sol no deja de mutar: las manchas y fulguraciones solares aumentan y disminuyen cada 11 años, un ciclo asociado a la inversión regular del campo magnético de la estrella. En las épocas de mayor actividad, son más frecuentes las «eyecciones de masa coronal», donde el Sol arroja al espacio enormes cantidades de plasma que pueden perturbar los satélites y otras señales electrónicas, en caso de llegar a la Tierra. Una mayor actividad solar durante el ciclo también produce auroras más espectaculares y hace que aumenten ligeramente las temperaturas en nuestro planeta. Pero también existen periodicidades más largas. El ciclo de Gleissberg (*en amarillo*), identificado por vez primera en 1862, intensifica y atenúa el ciclo de 11 años a lo largo de un siglo. El ciclo de Suess-De Vries (*verde*) dura unos 200 años, y el de Hallstatt (*azul*), del orden de 2400 años, como revelan los elementos radiactivos atrapados en los testigos de hielo, que llevan la impronta de la actividad del Sol. Pero nuestra estrella también puede ser errática, por lo que no resulta nada fácil predecir las manchas solares, según Alexei Pevtsov, astrónomo del Observatorio Solar Nacional de EE.UU.: «Hay un elemento de aleatoriedad».

Katie Peek

Historia reciente

N.º de manchas

Ciclo de Schwabe
11 años

Ciclo de Gleissberg
88 años
(en general)

El cómputo moderno de las manchas solares comenzó con la cámara oscura, que proyectaba la imagen del Sol.

Edmond Halley fue el primero en comprender la relación entre la actividad solar y las auroras.

En 1845, la primera fotografía de la superficie solar reveló un Sol en calma.

Una de las mayores eyecciones de masa coronal ocurrió en 2001, durante un máximo de manchas solares.

En abril de 1947 se registró la mayor mancha solar, con la mitad de diámetro que Júpiter.

El registro moderno de manchas solares (*arcos amarillos*) se solapa con los datos de los testigos de hielo. (Los arcos se dibujan solo como apoyo visual.)

Ciclo actual
El presente ciclo de 11 años comenzó en diciembre de 2019 y, por ahora (pese a que había predicciones de todo tipo), parece de una intensidad similar al anterior.

Una visión más amplia

N.º de manchas

Un equipo europeo empleó los elementos radiactivos carbono 14 y berilio 10 presentes en los testigos de hielo para estimar el número de manchas solares (*gris*) a lo largo de nueve milenios

Ciclo de Suess-De Vries
200 años

Ciclo de Hallstatt
2400 años

El polvo o las nubes de la atmósfera terrestre atenúan el Sol y permiten apreciar las grandes manchas solares a simple vista. Los astrónomos árabes, europeos, chinos y mayas las observaron. El primer dibujo conocido de las manchas data de 1128.

Los grandes mínimos aparecen cuando la actividad de las manchas solares se mantiene baja durante decenios.

Cómputo moderno (*rojo*)

FUENTES: DATOS DEL PROGRAMA SILSO, REAL OBSERVATORIO DE BÉLGICA, BRUSELAS; «A CONSISTENT MULTI-PROXY RECONSTRUCTION OF SOLAR ACTIVITY OVER NINE MILLENNIA», CHI JU WU ET AL. EN ASTRONOMY & ASTROPHYSICS, VOL. 615, ART. A93, JULIO DE 2018; KATIE PEEK (*gráfico*)

SISMOLOGÍA

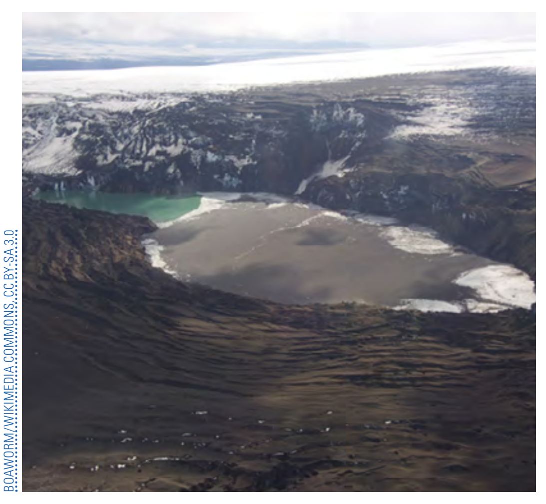
HIELO RESONANTE

Las capas de hielo pueden amplificar pequeños seísmos relacionados con la actividad volcánica

Los sismólogos se basan en el rumor del magma moviéndose en el subsuelo para predecir erupciones volcánicas inminentes. Sin embargo, los instrumentos sísmicos habituales ofrecen solo una imagen aproximada de lo que ocurre bajo los volcanes cubiertos de hielo de Islandia. Pero Andreas Fichtner, sismólogo de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, y sus colaboradores han mostrado que la misma capa de hielo que oculta esos volcanes puede amplificar señales sísmicas que, de otro modo, resultarían indetectables.

El volcán más activo de Islandia, el Grímsvötn, está totalmente cubierto por el mayor glaciar de Europa. En el pasado reciente, ha sufrido erupciones explosivas en torno a una vez por decenio, generando riesgo de inundaciones y peligrosas nubes de ceniza. En mayo de 2021, Fichtner y sus colegas instalaron 12,5 kilómetros de fibra óptica para estudiar la actividad y la estructura del Grímsvötn, efectuando mediciones continuas y en tiempo real de las vibraciones del suelo en los alrededores del volcán. Los investigadores estudiaron la transmisión de los pulsos de luz enviados a través del cable a fin de caracterizar dichas vibraciones en cada punto del trayecto.

El análisis los llevó a detectar casi 2000 temblores de tierra en menos de un mes, lo cual contrasta con los 18 registrados por la red sísmica nacional de Islandia, según la coautora del estudio Kristín Jónsdóttir, de la Agencia Meteorológica Islandesa. Y también captaron una extraña vibración rítmica, procedente del hielo que flotaba en el lago que ocupa la caldera del volcán.


BOAWORM/WIKIMEDIA COMMONS, CC BY-SA 3.0

Vista aérea del volcán Grímsvötn en agosto de 2011.

Una capa de hielo, como cualquier otro sólido, vibra con cierta frecuencia natural. Si experimenta una sacudida intensa que coincide con esa frecuencia, las vibraciones se amplifican, del mismo modo que la acción de un martillo neumático en la calle puede inducir un traqueteo en la mesa de la cocina. De acuerdo con los investigadores, el zumbido misterioso que detectaron provenía de «tremores volcánicos», terremotos de escasa magnitud causados por la actividad volcánica y geotérmica. Tales temblores son más conspicuos cerca de la caldera del volcán y pueden indicar la probabilidad de que se produzca una erupción.

«La resonancia natural de la capa de hielo actúa como una lupa», explica Fichtner, aumentando la intensidad de los tremores hasta hacerlos detectables. «Hasta donde sabemos, es un fenómeno que no se había observado antes.» El trabajo se ha publicado en *The Seismic Record*.

Esa amplificación también se produce en un contexto muy diferente, destaca Ebru Bozdag, geofísica de la Escuela de Minas de Colorado ajena al estudio. En lugares como Los Ángeles, prosigue, «sabemos que las cuencas sedimentarias son capaces de amplificar las ondas sísmicas, y por eso son tan peligrosas. Entiendo que la capa de hielo del volcán podría estar comportándose de forma similar».

Esos resonadores naturales pueden revelar la actividad geotérmica, cuyo seguimiento resulta «crucial para saber qué está ocurriendo en el volcán», asegura Corentin Caudron, sismólogo de la Universidad Libre de Bruselas que no participó en la investigación. «Este estudio abre nuevas perspectivas para vigilar los volcanes cubiertos por glaciares, tanto en Islandia como en otros lugares.»

Rachel Berkowitz

DILUVIOS TRAS LOS FUEGOS

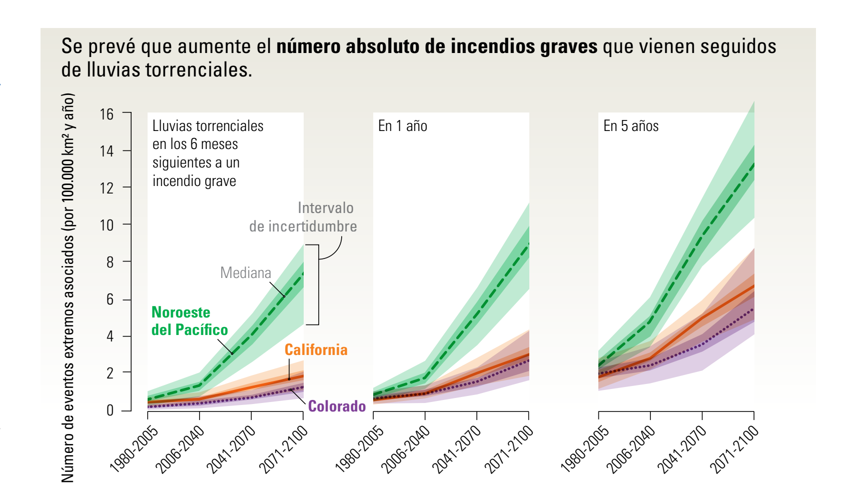
Cada vez será más habitual que los incendios vengan seguidos de lluvias torrenciales

El cambio climático tiende a sacar lo peor de la meteorología, ya sean episodios extremos de frío o calor, lluvias torrenciales o incendios. Y de acuerdo con un estudio reciente centrado en el Oeste de Estados Unidos, el calentamiento atmosférico incrementa las probabilidades de que caigan fuertes precipitaciones tras un incendio forestal. La confluencia de ambos fenómenos eleva el riesgo de que se produzcan deslizamientos de tierra e inundaciones relámpago.

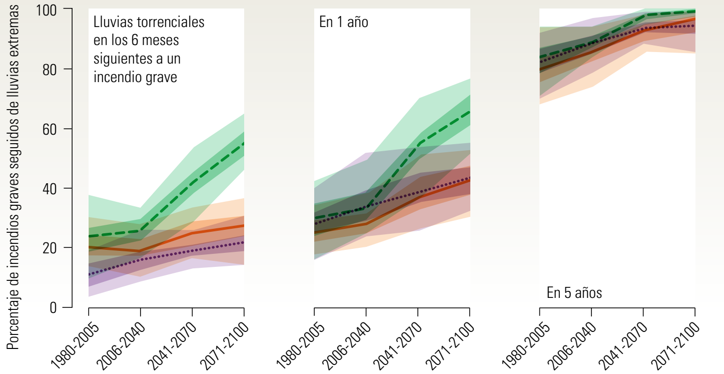
«Tras un incendio, se pierde toda la vegetación y no quedan estructuras radiculares que afiancen el suelo, por lo que este es mucho más vulnerable», explica Samantha Stevenson, climatóloga de la Universidad de California y coautora del estudio.

Los incendios no causan las tormentas, pero el aumento de temperatura que los agrava también permite que el aire contenga más humedad, y eso provoca que las lluvias descarguen más agua en poco tiempo [*véase* «Tormentas de vapor», por Jennifer A. Francis; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2022]. «Estamos hablando de tormentas muy intensas, en el percentil 99,9», subraya Stevenson.

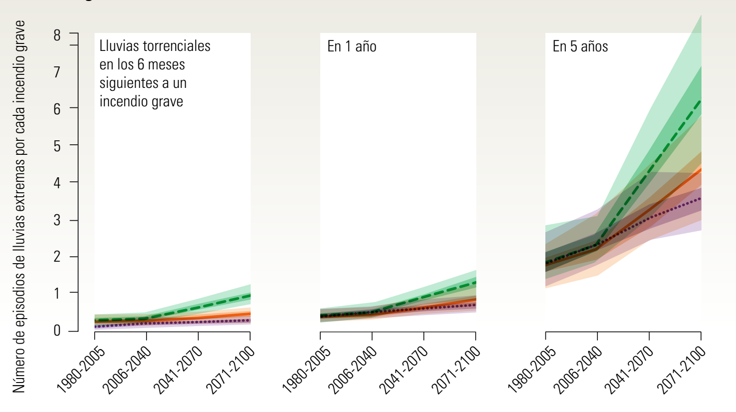
Clara Moskowitz







Y también aumentará el **número absoluto de episodios de lluvias torrenciales** tras cada incendio grave.



FUENTE: «CLIMATE CHANGE INCREASES RISK OF EXTREME RAINFALL FOLLOWING WILDFIRE IN THE WESTERN UNITED STATES», DANIELLE TOUMA ET AL. EN *SCIENCE ADVANCES*, VOL. 8, ART. EABM0320, ABRIL DE 2022 (*datos*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

LA IMAGEN DEL MES

VÓRTICES MARINOS

En el interior de las olas se generan numerosos minivórtices, además del principal

Imagínese la ola perfecta en el océano: una enorme pared de agua que se curva sobre sí misma antes de romper con espectacularidad cerca de la orilla. Coger tamaña ola constituiría el sueño de cualquier surfista, y la física que subyace bajo su agitada superficie no es menos impresionante.

Cuando una ola se enrosca, crea un tubo hueco de agua en rotación. Si uno pudiera atisbar en el interior, vería numerosos remolinos pequeños y delgados que giran alrededor de ese vórtice principal. Solo hace poco se ha empezado a investigar cómo y por qué se forman esas sutiles estructuras secundarias.

«Lo que ocurre en esencia es una separación», aclara Christine Baker, especialista en mecánica de fluidos de la Universidad de Washington. Cuando una ola empieza a romperse, las minúsculas regiones aireadas a lo largo del borde de ataque provocan que se desprendan del vórtice primario algunas corrientes, las cuales, a medida que adquieren velocidad, se retuercen y generan vórtices parecidos a costillas. Al principio, esas «costillas» son franjas anchas de agua que giran despacio, como un patinador sobre hielo que gira con los brazos extendidos, apunta Jim Thomson, oceanógrafo de la misma universidad. Pero, a medida que la ola avanza, los vórtices forman filamentos finos y giran cada vez más rápido, como cuando el patinador pega los brazos al costado. Esa rotación aumenta la separación entre el vórtice primario y los pequeños, mientras estos se rizan y crecen.

Baker emplea cálculos informáticos y experimentos físicos para investigar cómo los minivórtices arrastran basura y otros contaminantes desde la costa hacia el mar. Hasta la última década, apenas se atendía a ellos, en parte por la dificultad de fotografiarlos. Ahora, los modernos métodos de simulación por ordenador permitien modelizarlos. «Muchas veces no vemos ni estudiamos un fenómeno hasta que disponemos de las herramientas para ello», admite Thomson.

Joanna Thompson



MAURITIUS IMAGES GMBH/ALAMY STOCK PHOTO



EXPLORACIÓN ESPACIAL

EL INCREÍBLE VIAJE DE LAS VOYAGER

Tim Folger | Las naves espaciales que más se han alejado de nuestro planeta se están adentrando en una región inexplorada: el espacio interestelar

NASA/JPL-CALTECH

Si no se hubieran alineado los astros, no habrían llegado a despegar dos de las naves espaciales más extraordinarias jamás lanzadas. En este caso, en realidad, los que se alinearon fueron los planetas: los cuatro más grandes del sistema solar. Hace unos sesenta años, estaban adoptando poco a poco una configuración que no acontecía desde los albores del siglo XIX. Durante algún tiempo, esa inusual danza planetaria pasó desapercibida. El primero que la puso de relieve fue Gary Flandro, que a la sazón realizaba un doctorado en aeronáutica en el Instituto de Tecnología de California (Caltech).

Corría 1965, y la era de la exploración espacial acababa de comenzar: solo hacía ocho años que la Unión Soviética había lanzado el primer satélite artificial, el célebre Sputnik 1. A Flandro, que trabajaba a tiempo parcial en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, le habían encomendado hallar la forma más eficiente de mandar una nave espacial a Júpiter, o incluso a Saturno, Urano o Neptuno. Armado con uno de los instrumentos de precisión favoritos de los ingenieros del siglo XX —un lápiz—, representó las trayectorias orbitales de esos planetas gigantes y descubrió algo interesante: a finales de los setenta y principios de los ochenta, los cuatro quedarían engarzados como las perlas de un collar celestial, formando un largo arco junto con la Tierra.

Esa coincidencia significaba que un vehículo espacial podría aumentar su velocidad aprovechando el tirón gravitatorio de cada planeta gigante por el que pasara, como si fuera arrastrado por un cordel invisible que se rompiese en el último segundo y lanzara la sonda hacia su destino. Flandro calculó que esas múltiples «asistencias gravitatorias» servirían para reducir el tiempo de vuelo entre la Tierra y Neptuno de 30 a 12 años. Pero había una pega: el alineamiento solo se daba cada 176 años. Para alcanzar los planetas antes de que abandonaran esa disposición, habría que lanzar la nave hacia mediados de los setenta.

Al final, la NASA construyó dos vehículos espaciales para aprovechar esa oportunidad única. Las sondas Voyager 1 y 2, completamente idénticas, despegaron con 15 días de diferencia en el verano de 1977. Tras casi 45 años en el espacio, siguen funcionando y envían cada día datos a la Tierra desde más allá de los planetas más remotos del sistema solar. Han viajado más lejos y han subsistido más que ninguna otra nave. Y han entrado en el espacio interestelar, de acuerdo con nuestras ideas sobre la frontera entre la esfera de influencia del Sol y el resto de la galaxia. Son los únicos objetos fabricados por el hombre que lo han logrado, y seguirán ostentando esa distinción durante algunos decenios más, como poco. No está nada mal, teniendo en cuenta que la previsión inicial era que las misiones Voyager durasen tan solo cuatro años.

Hace cuatro décadas, al principio de su singladura, las sondas Voyager proporcionaron a los asombrados investigadores las primeras vistas cercanas de los satélites de Júpiter y Saturno. Esas imágenes revelaron la existencia de volcanes activos y agrietados campos de hielo en mundos que los astrónomos habían imaginado tan inertes y salpicados de cráteres como nuestra Luna. En 1986, la Voyager 2 se convirtió en el primer vehículo espacial en sobrevolar Urano, y tres años más tarde pasó por Neptuno. Hasta la fecha, es la única nave que ha visitado esos planetas. Ahora, como sondas interestelares pioneras situadas a más de 19.000 millones de kilómetros de la Tierra, deleitan y desconciertan a los expertos teóricos con una serie de hallazgos inesperados sobre esa región ignota.

Sin embargo, esa increíble odisea está llegando a su fin. Este año, la NASA tiene previsto empezar a desconectar algunos sistemas de las sondas, para dosificar sus reservas de energía y alargar su viaje sin precedentes hasta aproximadamente 2030. Es un momento agridulce para los científicos de la misión, muchos de los cuales han trabajado en ella desde el primer día.

EN SÍNTESIS

En 1977 se lanzaron las sondas Voyager 1 y 2, con la idea de que visitasen Júpiter y Saturno en una misión de cuatro años.

Esas naves no solo ofrecieron las primeras imágenes cercanas de los satélites de esos planetas, sino que también descubrieron numerosas lunas, y una de ellas acabó visitando Urano y Neptuno.

Cuarenta y cinco años después de su lanzamiento, las sondas Voyager siguen funcionando y enviando datos mientras se adentran en el espacio interestelar, donde no había llegado ninguna nave fabricada por el hombre.

Sin embargo, la singladura de estas naves está llegando a su fin: la NASA comenzará pronto a desconectar algunos de sus sistemas, para reservar energía y prolongar su viaje sin precedentes hasta más allá de 2030.





LISTA PARA DESPEGAR: La sonda Voyager 2 se sometió a pruebas en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA antes de su vuelo (*izquierda*). La nave se lanzó el 20 de agosto de 1977 (*derecha*).

NASA/JPL-CALTECH

Ahora se enfrentan al final de un proyecto que ha superado con creces todas las expectativas.

«Vamos ya por 44 años y medio», se admira Ralph McNutt, investigador del Laboratorio de Física Aplicada (APL) de la Universidad Johns Hopkins que ha dedicado gran parte de su carrera a las sondas Voyager. «Así que hemos superado en [más de] diez veces la garantía de esos malditos cacharros.»

Comienzos difíciles

Puede que los astros cooperasen, pero, en un primer momento, el Congreso de EE.UU. no lo hizo. Tras el informe de Flandro, la NASA trazó planes para un «Gran Recorrido» que enviaría hasta cinco sondas a los cuatro planetas gigantes y Plutón. Era un plan ambicioso y caro, y el Congreso lo rechazó. «Había esa visión grandiosa», señala Linda Spilker, planetóloga del JPL que empezó a trabajar en las misiones Voyager en 1977, pocos meses antes de los lanzamientos. «Pero el coste obligó a cercenarla.»

El Congreso acabó aprobando una versión reducida del Gran Recorrido, llamada inicialmente Mariner Júpiter-Saturno 1977, o MJS 77, que enviaría dos naves espaciales a solo dos planetas. Aun así, los ingenieros de la NASA se pusieron a diseñar, de forma un tanto subrepticia, vehículos capaces de soportar las exigencias de una misión mucho más larga. Esperaban que, una vez que las sondas gemelas demostraran de lo que eran capaces, su itinerario se vería ampliado hasta Urano, Neptuno y más allá.

«Cuatro años... eso iba a durar la misión principal», apunta Suzanne Dodd, quien se reincorporó al proyecto en 2010, como directora, después de un paréntesis de veinte años. «No obstante, si un ingeniero tenía la posibilidad de instalar una pieza un 10 por ciento más cara, aunque no fuera indispensable para una misión de cuatro años, optaba por esa alternativa y no se lo comunicaba necesariamente a los responsables.» El hecho de que los científicos fueran capaces de construir dos naves y todavía funcionen ambas resulta aún más notable, añade.

Era territorio inexplorado, tanto en lo referente a la ingeniería como a la navegación en el espacio profundo. Aún no se había acuñado el lema «el fracaso no es una opción», que en esa época tampoco hubiera resultado apropiado: a principios de los sesenta, la NASA se había propuesto enviar una serie de naves a la Luna, a fin de explorar emplazamientos para el futuro alunizaje de misiones tripuladas. Y necesitaron 12 intentos fallidos hasta que uno de ellos culminó con éxito.

«Por aquel entonces siempre lanzábamos dos naves», dado el elevado porcentaje de fracasos, comentaba Donald Gurnett, solo medio en broma. Gurnett, físico de la Universidad de Iowa e integrante del equipo original del proyecto Voyager, era un veterano de otras 40 misiones espaciales. Habló conmigo unas semanas antes





DISCO DE ORO: Cada una de las sondas Voyager transporta un disco de oro (*derecha*) con sonidos e imágenes de la Tierra, por si la interceptara una civilización extraterrestre. Los ingenieros precintaron el disco de la Voyager 1 antes del lanzamiento (*izquierda*).

NASA/JPL-CALTECH

de fallecer en enero de este año. (En su obituario, su hija Christina afirmó que lo único que lamentaba Gurnett era «no haber vivido para ver los datos que enviarían las sondas Voyager en los próximos diez años».)

Cuando se construyeron las sondas Voyager, solo había una nave espacial que hubiera usado una asistencia gravitatoria para llegar a otro planeta: la sonda Mariner 10, que aprovechó el tirón de Venus en su viaje hacia Mercurio. Pero las Voyager intentarían recibir varias asistencias, con márgenes de error de decenas de minutos. Júpiter, su primer objetivo, estaba unas diez veces más lejos de la Tierra que Mercurio. Y, además, las sondas tendrían que viajar a través del cinturón de asteroides. Antes de la misión Voyager, existía un intenso debate sobre si una nave espacial sería capaz de salvar esa región «sin terminar destrozada», rememora McNutt. No obstante, a comienzos de los setenta, las sondas Pioneer 10 y 11 la cruzaron indemnes, lo que demostró que la mayor parte del cinturón era espacio vacío y allanó el camino para las Voyager.

Para poder abordar todos esos retos, las sondas Voyager, del tamaño de un antiguo Volkswagen escarabajo, necesitaban algo de inteligencia a bordo. Así que los ingenieros de la NASA equiparon los ordenadores de los vehículos con 69 kilooctetos de memoria, menos de una cienmilésima parte de la capacidad de un teléfono inteligente típico. De hecho, esa comparación no es muy acertada. «Los ordenadores de las sondas Voyager tienen menos memoria que los mandos que abren la puerta de nuestros coches», señala Spilker. Todos los datos recogidos por los instrumentos de las sondas se almacenarían en grabadoras de ocho pistas y después se enviarían a la Tierra mediante un transmisor de 23 vatios, una potencia similar a la de una bombilla de frigorífico. A fin de compensar la escasa potencia del transmisor, ambas sondas portan una antena parabólica de 3,7 metros de diámetro para enviar y recibir señales.

«Nos parecía que estábamos en la cúspide de la tecnología», recuerda Alan Cummings, físico de Caltech y miembro del equipo original de las sondas Voyager. «Lo más sorprendente fue lo rápido que sucedió todo.» En cuatro años, el equipo de la MJS 77 había construido tres naves espaciales, entre ellas un modelo de prueba operativo a escala real. Las sondas fueron rebautizadas como Voyager 1 y 2 unos meses antes del lanzamiento.

Aunque hay muchos científicos que han trabajado en las Voyager a lo largo de las décadas, Cummings puede hacer una afirmación única. «Fui la última persona que tocó las naves antes de que despegaran», revela. Cummings era el

El viaje más largo

Cuarenta y cinco años después de su lanzamiento, las sondas gemelas Voyager 1 y 2 están atravesando una región donde jamás había llegado un vehículo fabricado por el hombre. La misión, en principio diseñada para durar cuatro años y sobrevolar Júpiter y Saturno, sigue su curso. La sonda Voyager 2 también visitó Urano y Neptuno, y ambas naves espaciales acabaron abandonando la heliosfera (la región de influencia del Sol) y adentrándose en el espacio interestelar. Aunque las sondas transmiten información sobre este territorio inexplorado, este año los científicos comenzarán a apagar algunos de sus instrumentos, con la esperanza de que los dispositivos restantes puedan continuar enviando datos aproximadamente hasta 2030.

VOYAGER 1

VOYAGER 2

Júpiter
5 de marzo de 1979
9 de julio de 1979

Tierra (lanzamiento)
5 de septiembre de 1977
20 de agosto de 1977

La Voyager 1 abandona el plano del sistema solar

35°

Saturno
12 de noviembre de 1980
25 de agosto de 1981

Las órbitas de Mercurio y Venus se han omitido por claridad

1985

1990

1985

Urano
24 de enero de 1986

Neptuno
25 de agosto de 1989

La Voyager 2 abandona el plano del sistema solar.

48°

1990

14 de febrero de 1990
UN PUNTO AZUL PÁLIDO
Más de nueve años después de su encuentro con Saturno, cuando estaba a unos 6000 millones de kilómetros de la Tierra, la Voyager 1 giró su cámara y tomó una última fotografía. Esa instantánea captó la Tierra como «una mota de polvo suspendida en un rayo de sol», en palabras de Carl Sagan, científico de la misión Voyager.

La misión interestelar

25 de agosto de 2012
5 de noviembre de 2018
LA ÚLTIMA FRONTERA
Los científicos creen que la Voyager 1 fue la primera nave de la historia en abandonar la heliosfera. Aunque su límite es difuso, el signo más claro de que la sonda lo había traspasado llegó en forma de un notable aumento en la intensidad de los rayos cósmicos, partículas que son bloqueadas por el campo magnético del Sol dentro de la heliosfera, pero que abundan en el espacio interestelar. La Voyager 2 cruzó esa misma frontera seis años más tarde.

VOYAGER 1
A 23.500 millones de kilómetros de la Tierra

Espacio interestelar
25 de agosto de 2012

Área ampliada

Frente de terminación

Heliosfera

Espacio interestelar
5 de noviembre de 2018

VOYAGER 2
A 19.500 millones de kilómetros de la Tierra

La misión planetaria

5 de septiembre de 1977
20 de agosto de 1977
LANZAMIENTO
La misión se diseñó para aprovechar un alineamiento inusual de los planetas exteriores. La sonda Voyager 2 se lanzó antes, pero llegó a Júpiter y Saturno después que la Voyager 1. Al poco de despegar, la Voyager 1 transmitió la primera fotografía conjunta de la Tierra y la Luna tomada desde una nave espacial.

1977-1980
1977-1981
MISIÓN PRINCIPAL
Estaba previsto que Júpiter y Saturno fueran los principales objetivos de estudio de ambas sondas, que en conjunto transmitieron 52.000 imágenes de ambos planetas y sus satélites, y además descubrieron 10 nuevas lunas.

12 de noviembre de 1980
FUERA DE PLANO
Tras sobrevolar Saturno y su satélite Titán, la trayectoria de la sonda Voyager 1 se curvó hacia «el norte» y abandonó el plano elíptico del sistema solar.

24 de enero de 1986
LÍMITES EXTERIORES
El plan original consideró demasiado caro que las naves viajasen hasta Urano y Neptuno, pero la trayectoria de la Voyager 2 mantenía viva esa posibilidad. Tras una exitosa visita a Saturno, la sonda parecía poder llegar a Urano con todos sus instrumentos operativos, así que la NASA aportó más fondos.

HOY EN DÍA
Las sondas Voyager siguen funcionando 45 años después de su lanzamiento, y transmiten datos desde distancias de miles de millones de kilómetros. Ahora, ambas surcan el espacio interestelar, una región a la que nunca había llegado una nave fabricada por el hombre.

HITOS DE LA MISIÓN VOYAGER

- Se lanzan las sondas Voyager
- Las sondas llegan a Júpiter
- La Voyager 1 llega a Saturno
- La Voyager 2 llega a Saturno
- La Voyager 2 llega a Urano
- La Voyager 2 llega a Neptuno
- La Voyager 1 fotografía *Un punto azul pálido*
- La Voyager 1 adelanta a la Pioneer 10
- La Voyager 1 atraviesa el frente de choque de terminación
- La Voyager 2 atraviesa el frente de choque de terminación
- La Voyager 1 entra en el espacio interestelar
- La Voyager 2 entra en el espacio interestelar

1980 1985 1990 1995 2005 2010 2015 2020

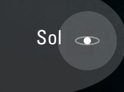
ASESORES: JOHN RICHARDSON (INVESTIGADOR PRINCIPAL DE CIENCIA DE PLASMA DE LA MISIÓN VOYAGER, INSTITUTO KAVLI DE ASTROFÍSICA E INVESTIGACIÓN ESPACIAL DEL MIT) Y MERAV OPHER (CATEDRÁTICO DEL DEPARTAMENTO DE ASTRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE BOSTON); MATTHEW TWOMBLY Y JUAN VELASCO/5W INFOGRAPHICS (*gráfico*)

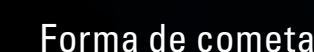
Burbuja protectora

Nuestra parte del sistema solar está envuelta en una burbuja llamada heliosfera, la región donde el viento solar (una corriente de partículas cargadas que fluye desde el Sol) arrastra consigo el campo magnético de la estrella. Esa zona se extiende hasta una distancia unas cuatro veces mayor que la que hay entre el Sol y Neptuno, pero no abarca todo el sistema solar: este incluye también la nube de Oort (un conjunto esférico de objetos similares a cometas) y acaba aproximadamente a mitad de camino a la estrella más cercana.

FORMA DE LA BURBUJA

No sabemos qué forma tiene la heliosfera, aunque a menudo se representa como una esfera o con una morfología similar a la de un cometa con su cola. Nuevos estudios sugieren que podría parecerse a un cruasán, con un sinuoso campo magnético que canaliza el viento solar.







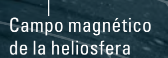
Esfera



«Cruasán»

HELIOSFERA

El viento solar se vuelve supersónico cerca del Sol. A partir del denominado «frente de choque de terminación», pierde velocidad y adopta una forma que está confinada por los campos magnéticos del medio interestelar.



Viento solar

Frente de choque de terminación
Límite donde el viento solar se frena hasta velocidades subsónicas

VOYAGER 1

VOYAGER 2

Heliopausa
Línea divisoria entre el campo magnético (y el plasma) solar e interestelar

Campo magnético del medio interestelar

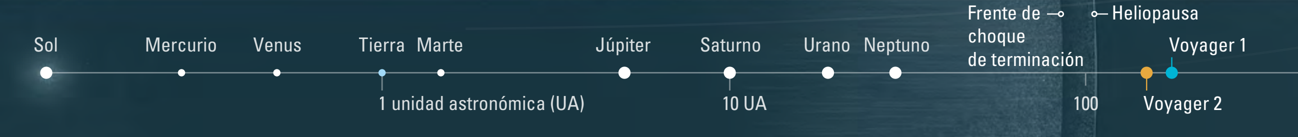
MEDIO INTERESTELAR

Además de un aumento de los rayos cósmicos galácticos, se esperaba que las sondas Voyager registrasen un cambio en la dirección del campo magnético del medio al penetrar en el espacio interestelar, pero eso no sucedió. Los científicos piensan que las líneas del campo magnético pueden unirse en la heliopausa (el límite de la heliosfera), de manera tal que algunas líneas del campo solar quedarían fijadas a las líneas de campo del medio interestelar, haciendo que estas roten en el exterior de la heliopausa.

Rayos cósmicos galácticos

Arco de choque
La heliosfera se desplaza a gran velocidad y puede crear una onda de choque conforme se abre paso a través del medio interestelar, que se mueve más despacio.

DISTANCIAS ASTRONÓMICAS



ASESORES: JOHN RICHARDSON (INVESTIGADOR PRINCIPAL DE CIENCIA DE PLASMA DE LA MISIÓN VOYAGER, INSTITUTO KAVLI DE ASTROFÍSICA E INVESTIGACIÓN ESPACIAL DEL MIT) Y MERAV OPHER (CATEDRÁTICO DEL DEPARTAMENTO DE ASTRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE BOSTON); MATTHEW TWOMBLY Y JUAN VELASCO/5W INFOGRAPHICS (*gráfico*)

responsable de dos detectores diseñados para medir el flujo de electrones y otras partículas cargadas cuando las sondas se encontraran con los planetas gigantes. En cada detector, las partículas pasarían a través de una pequeña «ventana», consistente en una lámina de aluminio de tan solo tres micras de espesor. A Cummings le preocupaba que los técnicos que habían trabajado en las sondas pudieran haber abollado o agujereado accidentalmente esas ventanas. «Así pues, había que inspeccionarlas justo antes del lanzamiento», subraya. «Y, de hecho, hallé que una de ellas estaba un poco suelta.»

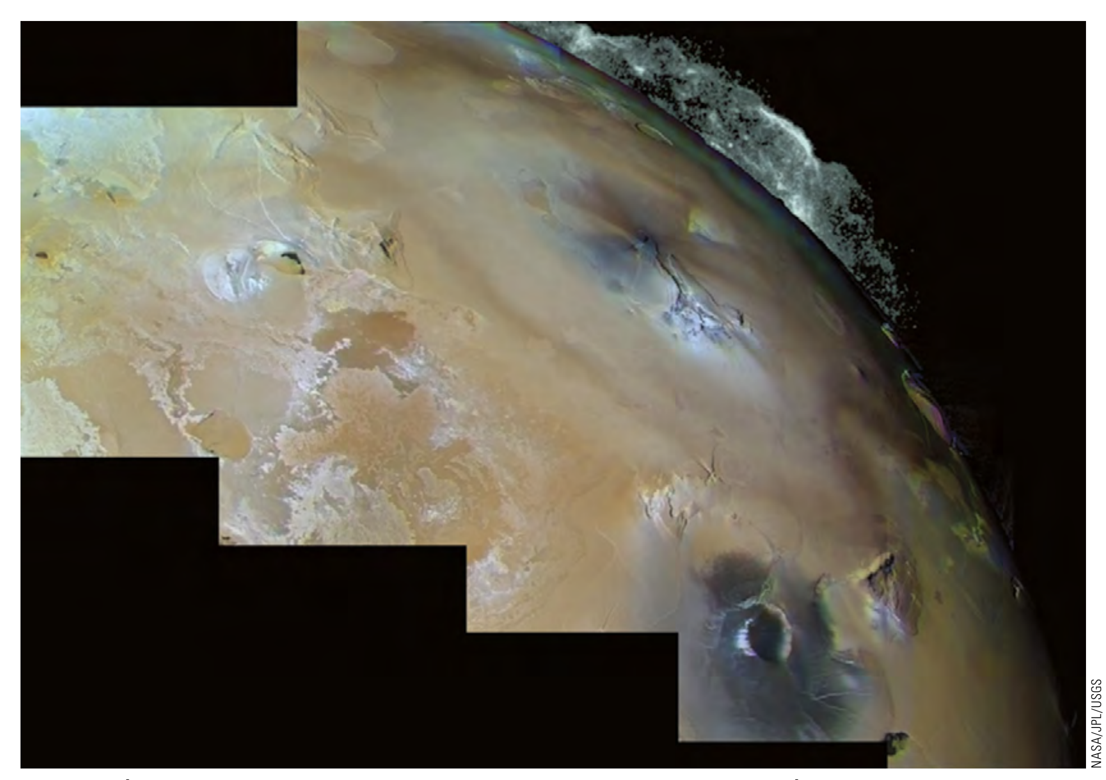
La misión principal

La sonda Voyager 1 llegó a Júpiter en marzo de 1979, 546 días después de despegar. La Voyager 2 siguió una trayectoria distinta y llegó en julio de ese mismo año. Ambas naves ofrecían una plataforma estable para sus cámaras de vídeo, que empleaban filtros rojos, verdes y azules para producir imágenes a todo color. Y es que las Voyager apenas giran mientras atraviesan el espacio a toda velocidad: su movimiento de rotación es más de quince veces más lento que el desplazamiento del horario de un reloj, lo que minimiza el riesgo de obtener imágenes borrosas. En el JPL, una muchedumbre en pie contempló cómo las sondas comenzaban a transmitir las primeras imágenes de Júpiter, unos tres o cuatro meses antes de alcanzar el planeta.

«Se instalaron pantallas de televisión en las principales salas de conferencias y en los pasillos», indica Spilker. «Así, cada imagen aparecería en un monitor según fuéramos recibiendo los datos. La expectación e ilusión sobre lo que veríamos cuando llegásemos muy cerca iban en aumento. Fue tremendamente emocionante.»

Cummings recuerda con claridad el día que echó su primer vistazo a Ío, la tercera mayor luna de Júpiter. «Fui a un edificio del campus de Caltech donde se retransmitían en directo las imágenes de las Voyager», relata. «Entré y me encontré con una gran imagen de Ío, toda naranja y negra. Pensé que los estudiantes nos estaban gastando una broma y era una foto de una pizza mal hecha.»

El colorido aspecto de Ío fue algo totalmente inesperado. Antes de que las sondas Voyager lo desmintiesen, se pensaba que todos los satélites del sistema solar serían más o menos parecidos: de un tono apagado y con cráteres. Nadie



NASA/JPL/USGS

ERUPCIÓN: El descubrimiento del volcán Pele, visible en esta fotografía de Ío tomada por la Voyager 1, confirmó que el satélite de Júpiter presenta vulcanismo activo.

había anticipado la enorme variedad de paisajes que descubrirían las Voyager en los mundos presentes en torno a Júpiter y Saturno.

La primera pista de que podía haber otros tipos de lunas llegó cuando las sondas Voyager aún estaban aproximadamente a un millón y medio de kilómetros de Júpiter. Uno de sus instrumentos, el Detector de Partículas Cargadas de Baja Energía (LECP), captó algunas señales insólitas. «El detector comenzó a registrar iones de oxígeno y azufre», precisa Stamatios Krimigis, que diseñó el LECP y ahora es director emérito del Departamento Espacial del APL en la Universidad Johns Hopkins. La densidad de iones de oxígeno y azufre era tres órdenes de magnitud mayor que la medida hasta ese momento. Al principio, su equipo pensó que el instrumento se había estropeado. «Revisamos los datos», explica Krimigis, «pero todo era correcto».

Las cámaras de las Voyager no tardaron en resolver el misterio: Ío tenía volcanes activos. Ahora sabemos que ese pequeño mundo, un poco mayor que la Luna, es el cuerpo con más actividad volcánica del sistema solar. «Hasta entonces, los únicos volcanes activos que conocíamos eran los de la Tierra», apunta Edward Stone, científico del proyecto Voyager desde 1972. «Y, de repente, teníamos un satélite con un vulcanismo diez veces mayor que el de nuestro planeta.» Los colores de Ío y los iones anómalos que registró el detector de Krimigis procedían de los elementos que expulsaban los volcanes del satélite. El mayor de ellos, conocido como Pele, ha arrojado penachos treinta veces más altos que el monte Everest, y sus escombros volcánicos cubren un área del tamaño de Francia.

Las sondas tomaron más de 33.000 fotografías de Júpiter y sus satélites. Parecía que cada imagen comportaba un nuevo descubrimiento: Júpiter tenía anillos, y Europa (una de las 53 lunas de Júpiter a las que se ha asignado un nombre propio) estaba recubierta por una agrietada corteza helada, cuyo espesor se estima hoy en más de 100 kilómetros. Al abandonar el sistema joviano, las naves recibieron una asistencia gravitatoria que aumentó su velocidad en más de 57.000 kilómetros por hora. Sin esa ayuda, no habrían podido superar la atracción gravitatoria del Sol y alcanzar el espacio interestelar.

Las sondas Voyager se separaron en Saturno. La Voyager 1 se internó en los anillos del planeta (y recibió el impacto de miles de granos de polvo), sobrevoló Titán, una luna envuelta en una neblina anaranjada, y luego se dirigió «al norte» y abandonó el plano de la eclíptica. Mientras, la Voyager 2 continuó en solitario hacia Urano y Neptuno. En 1986, encontró 10 nuevos satélites alrededor de Urano y añadió el planeta a la creciente lista de mundos con anillos. Sin embargo, apenas cuatro días después de su máxima aproximación al planeta, los hallazgos de la Voyager 2 quedaron eclipsados por la explosión del transbordador espacial Challenger al poco de despegar. Murieron los siete miembros de la tripulación, incluida Christa McAuliffe, una profesora de secundaria de New Hampshire que habría sido el primer civil en viajar al espacio.

Tres años más tarde, mientras pasaba a unos 4900 kilómetros de la azulada atmósfera de metano de Neptuno, la Voyager 2 midió vientos de hasta 1650 kilómetros por hora, los más rápidos de cualquier planeta del sistema solar. Se descubrió que Tritón, la mayor luna de Neptuno, era uno de los lugares más fríos del sistema solar, con una temperatura superficial de –235 grados Celsius. Los volcanes de hielo del satélite arrojaban nitrógeno gaseoso y partículas de polvo hasta alturas de más de ocho kilómetros.

Las instantáneas de Neptuno y sus satélites que adquirió la Voyager 2 habrían sido las últimas captadas por cualquiera de las dos sondas si no hubiera sido por Carl Sagan, que formaba parte del equipo de obtención de imágenes de la misión. Una vez finalizado el Gran Recorrido, la NASA tenía previsto apagar las cámaras de ambas naves. Aunque el proyecto se había prorrogado con la esperanza de que las sondas Voyager llegasen al espacio interestelar (por lo que se renombró oficialmente como Misión Interestelar Voyager), no habría fotografías más allá de Neptuno, solo un vacío infinito y estrellas inalcanzables.

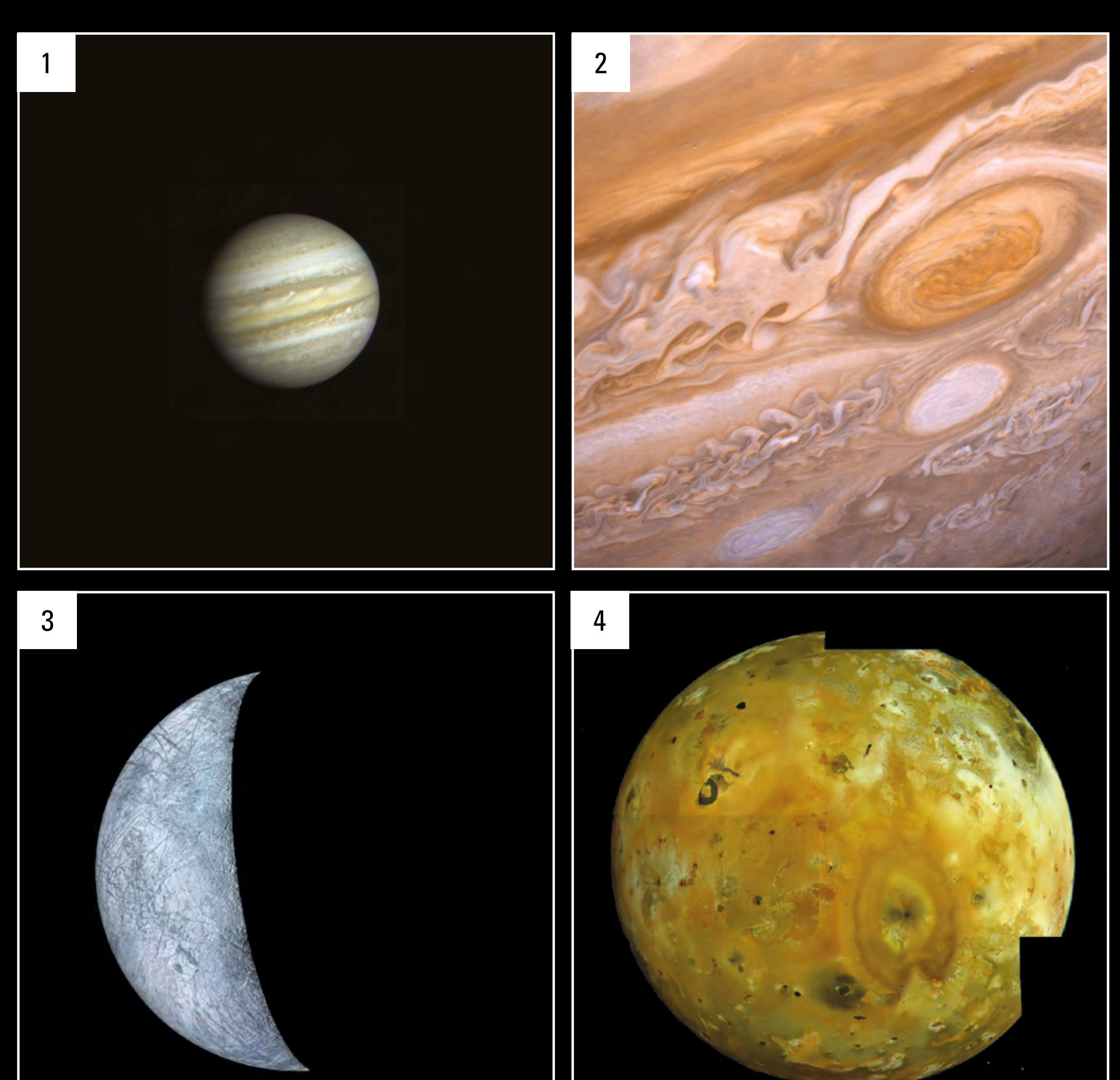
Sagan insistió a los responsables de la NASA para que la Voyager 1 transmitiese una última serie de imágenes. Así que, el día de San Valentín de 1990, la sonda orientó sus cámaras hacia el interior del sistema solar y tomó las últimas 60 instantáneas. La más evocadora, popularizada por Sagan como *Un punto azul pálido*, captó la Tierra desde una distancia de 6000 millones de kilómetros. Es el retrato más distante que tenemos de nuestro planeta, que aparece envuelto en una lánguida luz solar reflejada por la cámara y apenas es visible: ni siquiera ocupa un pixel completo.

Sagan, que murió en 1996, «trabajó con denuedo para convencer a la NASA de que merecía la pena volver la vista atrás para mirarnos a no-

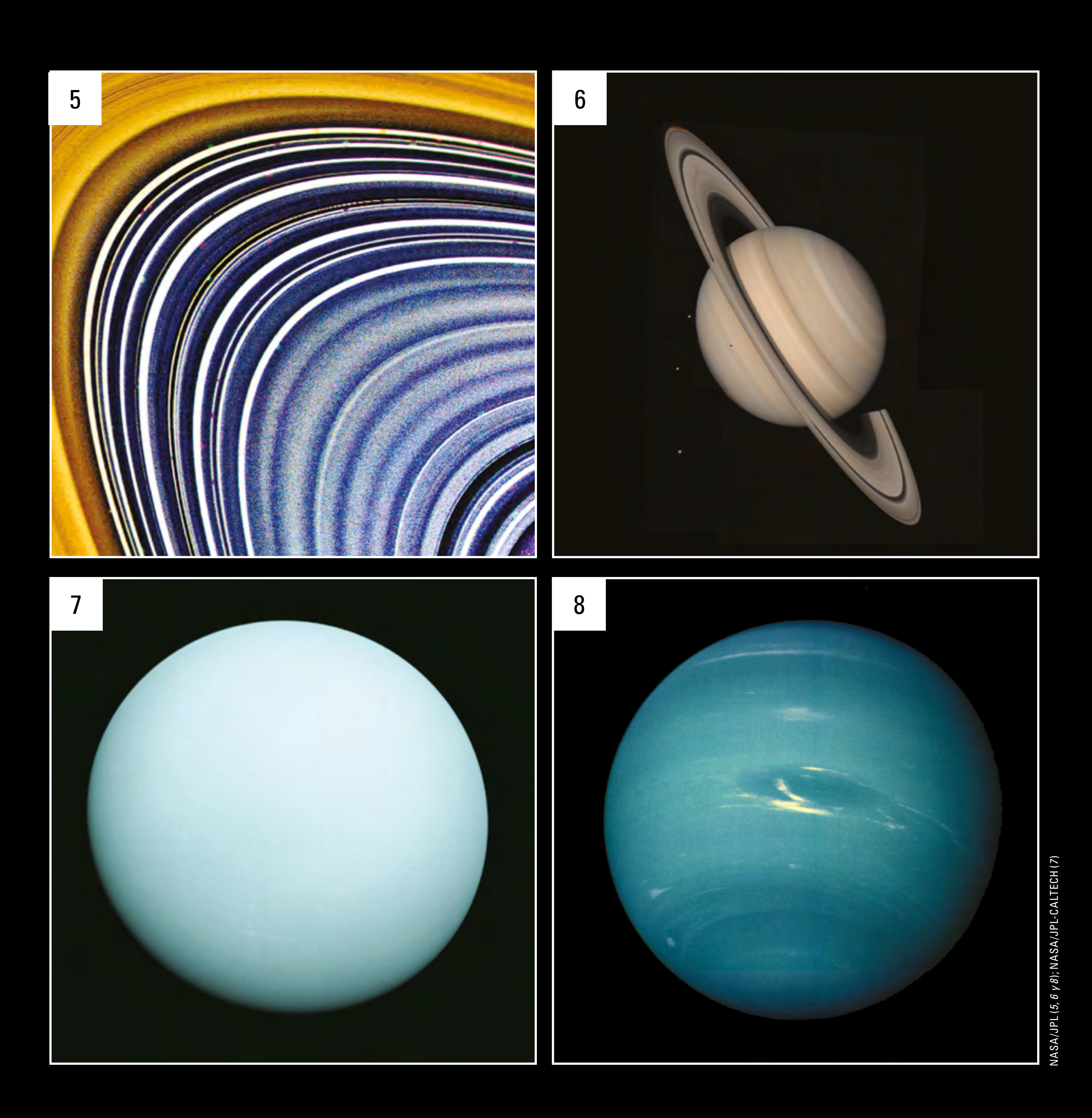
Grandes éxitos de las Voyager

Estas sondas gemelas realizaron un gran recorrido por los planetas gigantes del sistema solar, pasando por Júpiter (*1*, *2*) y Saturno (*5*, *6*) y tomando las primeras imágenes cercanas de los satélites de esos planetas.

Entre las lunas de Júpiter, Europa (*3*) resultó estar cubierta de hielo, e Ío (*4*), repleta de volcanes. Estos hallazgos sorprendieron a los científicos, que esperaban hallar satélites grises y salpicados de cráteres, como nuestra Luna. La Voyager 2 también sobrevoló Urano (*7*) y Neptuno (*8*), y es la única nave que ha visitado esos planetas.



NASA/JPL (*1, 2 y 4*); NASA/JPL/USGS (*3*)



NASA/JPL (*5, 6 y 8*); NASA/JPL-CALTECH (*7*)

sotros mismos y constatar lo diminuto que era ese punto azul pálido», celebra Spilker.

Más y más lejos

Hoy, las sondas Voyager están a tanta distancia de la Tierra que una señal de radio viajando a la velocidad de la luz tarda casi 22 horas en llegar hasta la Voyager 1, y algo más de 18 horas en alcanzar a la Voyager 2. Cada día se alejan otros cuatro o cinco segundos luz, y su único vínculo con la Tierra es la Red del Espacio Profundo de la NASA, tres estaciones de seguimiento distribuidas por el mundo (una de ellas está en Madrid) que permiten la comunicación ininterrumpida con las naves pese a la rotación de la Tierra. A medida que las sondas Voyager se separan de nosotros en el espacio y el tiempo, sus señales se van haciendo cada vez más débiles. «La Tierra es un lugar muy ruidoso», afirma Glen Nagle, responsable de comunicación y divulgación de la estación de Canberra de la Red del Espacio Profundo. «Todo produce ruido: las radios, las

televisiones, los teléfonos móviles. Y eso hace que cada vez sea más difícil oír los sutiles murmullos de esas naves.»

Aun siendo casi imperceptibles, esos susurros han trastocado las expectativas de los astrónomos sobre lo que hallarían las sondas Voyager al entrar en la fase interestelar de la misión. Stone y otros científicos del proyecto con los que hablé me advirtieron que no mezclase el límite del espacio interestelar con el del sistema solar. El sistema solar incluye la lejana nube de Oort, un conjunto esférico de cuerpos similares a cometas ligados por la gravedad solar que se puede extender hasta mitad de camino a la estrella más cercana [*véase* «La nube de Oort», por Paul R. Weissman; Investigación y Ciencia, noviembre de 1998]. Las Voyager no alcanzarán su límite interior hasta dentro de al menos 300 años. Pero el espacio interestelar está mucho más cerca: comienza donde cesa el fenómeno del viento solar.

Como todas las estrellas, el Sol emite un flujo constante de partículas cargadas y campos magnéticos: el viento solar. Este se propaga desde el Sol a velocidades hipersónicas, igual que un globo que se hincha, y conforma lo que los astrónomos llaman heliosfera. Al internarse en el espacio, el viento solar arrastra consigo el campo magnético de nuestra estrella. La presión de la materia interestelar acaba por detener la expansión de la heliosfera y crea una frontera con el espacio interestelar, la cual viene precedida por un enorme frente de choque «de terminación». Antes de la misión Voyager, existían grandes discrepancias entre las diversas estimaciones de la distancia a esa frontera, conocida como heliopausa.

«En realidad, algunas de ellas eran simples suposiciones», valoraba Gurnett. Una de las primeras estimaciones situaba la heliopausa tan cerca como Júpiter. Los cálculos que realizó en 1993 el propio Gurnett arrojaban una distancia de entre 116 y 177 unidades astronómicas (UA), unas 25 veces mayor. (1 UA es la distancia entre la Tierra y el Sol, y equivale a unos 150 millones de kilómetros.) Gurnett me explicó que esos números no tuvieron una gran acogida entre sus colegas. En 1993, la Voyager 1 ya había recorrido 50 UA. «Si la heliopausa estaba a 120 UA, aún faltaban 70 UA.» Si Gurnett estaba en lo cierto, las sondas Voyager (que recorrían unas 3,5 UA por año) no abandonarían la heliosfera hasta dos decenios más tarde, como mínimo.

Esa predicción suscitó algunas preguntas incómodas: ¿durarían tanto las sondas Voyager? ¿Y el apoyo del Congreso? El presupuesto de la misión se había ampliado con la esperanza de que las naves cruzasen la heliopausa a unas 50 UA de la Tierra, pero sobrepasaron ese punto sin encontrar ningún signo del tránsito interestelar. Los astrónomos pensaban que las sondas Voyager detectarían un repentino aumento de los rayos cósmicos galácticos, partículas de alta energía emitidas casi a la velocidad de la luz desde las supernovas y otros cataclismos acaecidos en el espacio profundo. El enorme escudo magnético formado por la heliosfera desvía la mayoría de los rayos cósmicos de baja energía antes de que puedan alcanzar el sistema solar interior. «Nos protege de al menos el 75 por ciento de todo lo que nos llega», precisa Stone.

El equipo de la misión Voyager también esperaba que las naves registrasen un cambio en el campo magnético. Suponían que el campo magnético interestelar, presuntamente generado por las estrellas cercanas y las enormes nubes de gases ionizados, no tendría la misma orientación que el campo magnético de la heliosfera. Sin embargo, las sondas Voyager tampoco habían detectado ninguna variación.

En 16.700 años, la Voyager 1 pasará por nuestra estrella más cercana, Próxima Centauri

Los cálculos de Gurnett resultaron proféticos: pasaron casi 20 años antes de que una de las Voyager llegara por fin a la heliopausa. Durante ese tiempo, la misión superó a duras penas las amenazas respecto a su financiación, y el equipo se redujo de cientos de científicos e ingenieros a unas pocas decenas de supervivientes muy unidos. La mayoría de ellos continúan en sus puestos. «Cuando formas parte de un proyecto tan longevo, empiezas a ver a los compañeros como tu familia», comparte Spilker. «Tuvimos a nuestros hijos por la misma época. Nos íbamos juntos de vacaciones. Ahora, en el equipo hay gente de varias generaciones, y algunos de los más jóvenes ni siquiera habían nacido cuando se lanzaron las naves.»

La tenacidad y la entrega de esa hermandad tuvieron su recompensa el 25 de agosto de 2012, cuando la Voyager 1 por fin cruzó la heliopausa. Pero una parte de los datos que envió resultaban desconcertantes. «Retrasamos el anuncio de que habíamos llegado al espacio interestelar porque no conseguíamos ponernos de acuerdo sobre ello», señala Cummings. «Hubo mucho debate durante casi un año.»

«La misión ha durado tanto porque casi todo se basaba en componentes cableados. Hoy, los ingenieros no saben hacer algo así»

Stamatios Krimigis, Universidad Johns Hopkins

Aunque la Voyager 1 había registrado el salto previsto en la densidad del plasma (el detector de ondas de plasma diseñado por Gurnett arrojó un aumento de 80 veces), no había indicios de un cambio en la dirección del campo magnético. Si el vehículo había pasado de una zona permeada por el campo magnético del Sol a otra donde el campo era generado por otras estrellas, ¿no debería haberse producido una variación apreciable? «Eso constituyó una sorpresa», reconoce Cummings. «Y aún me incomoda. Pero mucha gente ha acabado por aceptarlo.»

Cuando la Voyager 2 alcanzó el espacio interestelar en noviembre de 2018, tampoco detectó una modificación del campo magnético, y además añadió un nuevo enigma: encontró la heliopausa a 120 UA de la Tierra, la misma distancia que había señalado su sonda gemela seis años antes. Eso no encajaba con los modelos teóricos, que predecían que la heliosfera debería expandirse y contraerse en sincronía con el ciclo solar de 11 años. A lo largo de ese período, el viento solar aumenta y disminuye. La Voyager 2 llegó a la heliopausa durante un máximo del viento, lo cual, de acuerdo con los modelos, debería haberla desplazado hasta más allá de las 120 UA. «Ningún experto teórico se lo esperaba», afirma Krimigis. «Creo que los modelos se han mostrado insuficientes en relación con los hallazgos de las Voyager.»

Ahora que las sondas están ofreciendo datos reales a los teóricos, sus modelos de la interacción entre la heliosfera y el medio interestelar se han vuelto más complejos. «La idea general es que el Sol surgió en una región caliente e ionizada» y luego entró en una zona irregular y parcialmente ionizada de la galaxia, detalla Gary Zank, astrofísico de la Universidad de Alabama en Huntsville. Es probable que la región caliente se formara a raíz de una supernova: una estrella antigua cercana (o quizá varias) que explotó al final de su vida y calentó el espacio, al tiempo que arrancaba electrones de sus átomos. Podemos pensar en el límite de esa región «como la orilla del mar, con el agua y las olas formando remolinos y mezclándose», prosigue Zank. «Estamos en ese tipo de región turbulenta [...] los campos magnéticos giran y se retuercen. No son como los campos suaves que les gusta dibujar a los teóricos», aunque la cantidad de turbulencia medida puede diferir según la clase de observación. Los datos de las sondas Voyager muestran pocas variaciones del campo a gran escala, pero muchas fluctuaciones a pequeña escala cerca de la heliopausa, debido a la influencia de la heliosfera sobre el medio interestelar. Se cree que, en algún momento, las naves dejarán atrás esos parajes turbulentos y se encontrarán por fin con el campo magnético interestelar puro.

Pero ese escenario también podría ser completamente erróneo. Algunos investigadores creen que las sondas Voyager aún no han abandonado la heliosfera. «No hay ninguna razón para que el campo magnético tenga justo la misma orientación en la heliosfera y en el medio interestelar», opina Len A. Fisk, experto en plasma espacial de la Universidad de Míchigan y ex administrador adjunto de la NASA. En los últimos años, Fisk y George Gloeckler, colega de su universidad y científico de la misión de larga trayectoria, han desarrollado un modelo de la heliosfera que aleja su límite otras 40 UA.

Sin embargo, a la mayoría de los que trabajan en el campo les ha convencido el drástico incremento de los rayos cósmicos galácticos y de la densidad de plasma que midieron las sondas Voyager. «En vista de ello», sentencia Cummings, «es muy difícil sostener que no están en el espacio



UNA MOTA: Una de las últimas fotografías de la sonda Voyager 1 fue esta imagen de la Tierra vista a una distancia de unos 6000 millones de kilómetros, bautizada como *Un punto azul pálido* por el científico de la misión Carl Sagan.

NASA/JPL-CALTECH

interestelar. Pero tampoco es que encaje todo, y por eso necesitamos una sonda interestelar».

McNutt lleva décadas abogando por una misión así. Recientemente, él y sus colaboradores de la Universidad Johns Hopkins han redactado un informe de 500 páginas que presenta el proyecto de una sonda interestelar que se lanzaría en 2036 y podría alcanzar la heliosfera en 15 años, 20 menos de los que tardó la Voyager 1. Y, a diferencia de las misiones Voyager, esa sonda interestelar estaría especialmente diseñada para estudiar el límite exterior de la heliosfera y sus alrededores. En dos años, las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de EE.UU. decidirán si esa misión debería ser una de las prioridades de la NASA para la próxima década.

Una sonda interestelar podría dar respuesta a una de las preguntas más básicas sobre la heliosfera. «Si mirásemos esa estructura desde el exterior, ¿qué aspecto tendría?», se pregunta McNutt. «La verdad es que no lo sabemos. Es como tratar de comprender la apariencia de una pecera desde el punto de vista del pez. Necesitamos verla desde fuera.» En algunas propuestas, conforme la heliosfera avanza a 725.000 kilómetros por hora, la materia interestelar fluye suavemente a su paso, igual que el agua alrededor de la proa de un barco, y eso hace que la heliosfera adopte una forma similar a la de un cometa. Un reciente modelo informático, desarrollado por el astrónomo Merav Opher y sus colegas de la Universidad de Boston, predice que una dinámica más turbulenta confiere a la heliosfera una forma parecida a un cruasán cósmico.

«Es un tema sobre el que se puede discutir largo y tendido en cualquier congreso científico

relevante», asegura McNutt, «pero habrá que ir allí y realizar algunas mediciones para ver lo que sucede. Sería genial saber qué aspecto tiene nuestro vecindario».

Discos de oro

Hay cosas que se quedan obsoletas con el tiempo, como los contestadores automáticos, los reproductores de vídeo o las monedas de un céntimo. No es el caso de las sondas Voyager, que siguen siendo útiles pese a emplear componentes de hace cincuenta años. «En esos instrumentos apenas hay *software*», destaca Krimigis. «No llevan microprocesadores, porque aún no existían.» Los diseñadores de las sondas no pudieron apoyarse en miles de líneas de código para operar las naves. «En general», prosigue Krimigis, «creo que la misión ha durado tanto porque casi todo se basaba en componentes cableados. Los ingenieros actuales no saben hacer algo así. Ni siquiera sé si [hoy en día] sería posible construir una nave espacial tan simple. Las sondas Voyager son las últimas de su especie.»

No será fácil despedirnos de estos vehículos pioneros. «Es duro ver que se acerca el final», admite Cummings. «Sin embargo, logramos algo asombroso. Podríamos no haber llegado a la heliopausa, pero lo hicimos.»

La Voyager 2 aún mantiene cinco instrumentos operativos, y la Voyager 1, cuatro. Todos se alimentan mediante un dispositivo que convierte en electricidad el calor de la desintegración radioactiva del plutonio. No obstante, la potencia generada disminuye unos cuatro vatios por año, así que la NASA se ha visto obligada a elegir. Hace dos años, los ingenieros de la misión apagaron el calefactor del detector de rayos cósmicos, un instrumento que había sido decisivo para establecer el cruce de la heliopausa. Todo el mundo esperaba que se averiase.

«La temperatura bajó 60 o 70 grados Celsius, y se situó muy lejos de los límites explorados en las pruebas», explica Spilker, «pero el aparato siguió funcionando. Fue increíble».

Es probable que los dos últimos dispositivos que se desconecten sean el magnetómetro y el instrumento de ciencia de plasma. Ambos se encuentran en el cuerpo de la nave espacial, donde aprovechan el calor que emiten los ordenadores. Los otros instrumentos están suspendidos de un brazo de fibra de vidrio de 13 metros de longitud. «Por eso, al apagar los calefactores», apunta Dodd, «se enfrían enormemente».

¿Cuánto más podrían durar las Voyager? «Si todo va muy bien, quizás podamos prolongar las misiones hasta la década de 2030», aventura Spilker. «Todo depende de la potencia. Ese es el factor limitante.»

La singladura de las sondas Voyager proseguirá incluso una vez que enmudezcan por completo. Dentro de 16.700 años, la Voyager 1 pasará por nuestra estrella más cercana, Próxima Centauri, y 3600 años más tarde llegará la Voyager 2. Luego continuarán dando vueltas alrededor de la galaxia durante millones de años. Permanecerán ahí, más o menos intactas, eones después de que nuestro Sol haya colapsado y la heliosfera haya dejado de existir, por no hablar del punto azul pálido. En algún momento de sus viajes, podrían entregar un último mensaje. No será mediante ondas de radio y, si llega a su destino, los receptores no serán seres humanos.

El mensaje está contenido en otros dispositivos del pasado: dos discos fonográficos, aunque no como los habituales de vinilo: están hechos de cobre, recubiertos de oro y sellados en un estuche de aluminio. En los surcos de estos «discos de oro» se han codificado sonidos e imágenes que pretenden dar una idea del mundo del que proceden las sondas Voyager. Hay fotografías de niños, delfines, bailarines y puestas de sol, y sonidos de grillos, la lluvia al caer o el beso de una madre a su hijo. Y también 90 minutos de música, incluidos el *Concierto de Brandeburgo número 2* de Bach y la canción *Johnny B. Goode*, de Chuck Berry.

Además, hay una misiva de Jimmy Carter, que era el presidente de EE.UU. cuando despegaron las sondas Voyager. «Lanzamos este mensaje al cosmos», reza un fragmento. «Esperamos que algún día, tras haber resuelto los problemas a los que nos enfrentamos, podamos unirnos a una comunidad de civilizaciones galácticas. Esta grabación representa nuestra esperanza, nuestra determinación y nuestra buena voluntad en un universo inmenso e impresionante.»

Tim Folger es periodista científico. Escribe para *National Geographic*, *Discover* y otras publicaciones estadounidenses.



EN NUESTRO ARCHIVO

Preparando el encuentro del Voyager 2 con Urano. Richard P. Laeser, William I. McLaughlin y Donna M. Wolff en *IyC*, enero de 1987.

Los confines de la heliosfera. J. R. Jokipii y Frank B. McDonald en *IyC*, junio de 1995.

ENTENDER LA DESERTIFICACIÓN PARA FRENARLA

Jaime Martínez-Valderrama, Emilio Guirado y Fernando T. Maestre | La desertificación es un proceso complejo cuya definición ha estado rodeada de ambigüedad y controversia, lo que ha dificultado abordarla. Los programas e iniciativas actuales para contrarrestarla deben aprender de los errores del pasado



LA AGRICULTURA INTENSIVA de regadío en las zonas áridas, como la que se practica en el sureste peninsular, provoca la sobreexplotación de los acuíferos y aumenta el riesgo de desertificación.

ALBERTO GUERRERO

Cada cierto tiempo renace el interés por la desertificación, a colación de alguna catástrofe ligada al cambio climático, como una sequía prolongada, un episodio de lluvias torrenciales e inundaciones que arrasan un territorio, o un incendio forestal devastador. Ejemplos recientes de ello son la total desecación de las marismas del Parque Nacional de Doñana o los incendios de grandes dimensiones que han asolado nuestro país este verano. En los medios de comunicación, esta atención coyuntural suele venir acompañada de un lenguaje grandilocuente e imágenes de desiertos y hambrunas.

Se tiende a identificar la desertificación con los desiertos, que se perciben como una suerte de monstruos con voluntad propia que arrasan territorios fértiles y prósperos. Sin embargo, los desiertos son ecosistemas complejos y maduros fruto de unas condiciones extremas de aridez. Por el contrario, la desertificación es un proceso que permanece latente, propio de las zonas áridas, desencadenado por unas intervenciones humanas inadecuadas. Pero ¿en qué consiste exactamente este proceso? ¿Cuáles son sus causas? ¿Qué actuaciones permiten evitarlo o revertirlo?

Como veremos, la desertificación es un concepto enrevesado rodeado de ambigüedad y controversia. La definición oficial es la propuesta en 1994 por la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), el principal instrumento que aborda el proceso a escala mundial. La describe como «la degradación de las tierras áridas, semiáridas y seco-subhúmedas como consecuencia de las variaciones climáticas y las actividades humanas», entendiendo la degradación como «la reducción o pérdida de la productividad biológica o económica y de biodiversidad».

Una definición tan amplia, unida a la atención circunstancial que recibe la desertificación, contribuyen a que su significado se tergiverse y, como consecuencia, se reduzcan las posibilidades de contrarrestarla. Prueba de ello son las soluciones que intentan frenarla cuando ya está demasiado avanzada, que conllevan grandes inversiones y pocas garantías de éxito. Es el caso de la construcción de grandes infraestructuras hidráulicas para combatir la escasez hídrica o de murallas de árboles para contener el desierto, así como la implementación de eficientes sistemas tecnológicos para aprovechar lo mejor posible unos recursos cada vez más escasos, como el agua de riego.

La retórica que rodea a la desertificación, la fuerte politización de la CNULD y el papel marginal que desempeña la ciencia en la toma de decisiones han enquistado un problema que afecta al bioma más extenso de la Tierra: las zonas áridas. Para abordarlo es necesario comprender bien en qué consiste y cuáles son sus circunstancias. En este artículo hablaremos sobre la relevancia de la desertificación en el mundo y la ilustraremos con algunos ejemplos emblemáticos. También revisaremos cómo afecta a nuestro país y debatiremos sobre las posibles soluciones, que apuestan por recuperar el territorio degradado mediante diversas medidas de conservación y restauración de los recursos naturales.

EN SÍNTESIS

Uno de los principales problemas ambientales que existe en el mundo es la desertificación, que se está agravando debido a la creciente aridez del planeta y la mala gestión del territorio.

La aplicación de medidas para frenarla o revertirla se ha visto lastrada por la dificultad de definir con precisión este proceso complejo, desencadenado por una combinación de variables biofísicas y socioeconómicas.

En España, especialmente vulnerable debido a sus condiciones climáticas, el auge de la agricultura y la ganadería intensivas de las últimas décadas ha acentuado la desertificación. La restauración ecológica y la ordenación del territorio son instrumentos esenciales para contrarrestarla.

Deriva conceptual

La desertificación acostumbra a describirse a partir de la definición oficial de la CNULD indicada arriba y las principales cifras que la caracterizan. Cabe destacar el ámbito climático al que se restringe: las zonas áridas. En rigor, estas son una subcategoría de las «tierras secas». Pero este término, que es una traducción literal del inglés *drylands*, no suele emplearse en castellano, que se inclina por denominar zonas áridas al conjunto de las tierras con clima árido, semiárido y seco-subhúmedo.

Según la CNULD, las zonas áridas son aquellas cuyo índice de aridez (IA) se halla entre 0,65 y 0,05. Este índice representa una medida del déficit de humedad y se calcula como la proporción entre la precipitación media anual y la

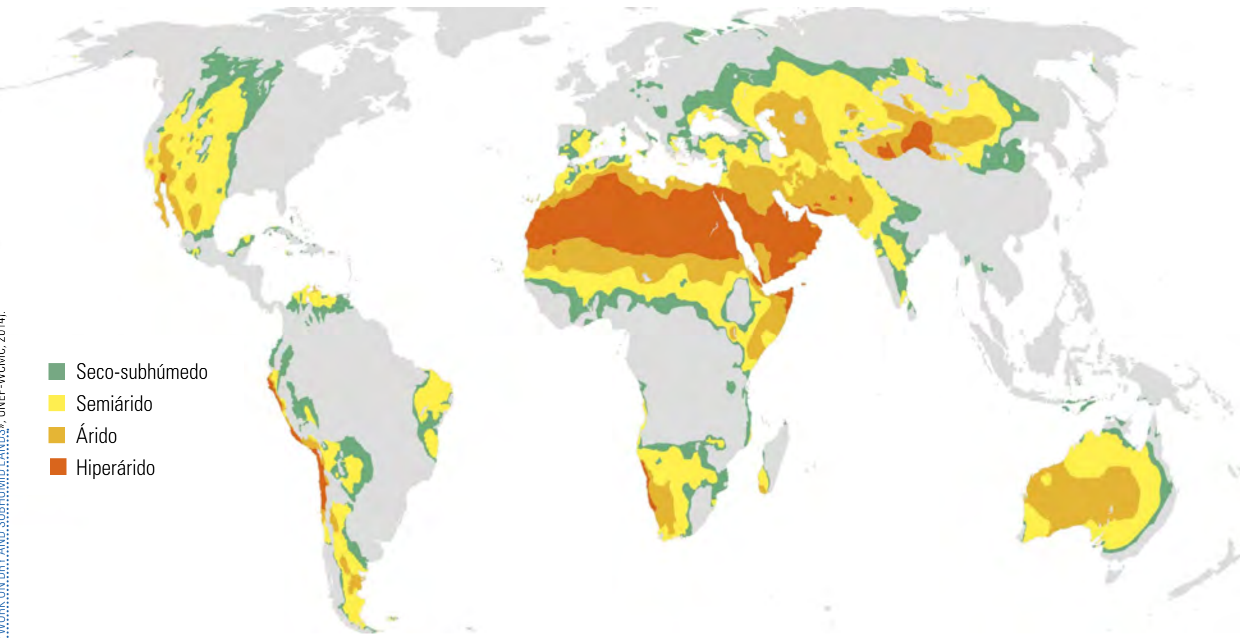
evapotranspiración potencial anual (la cantidad de agua que podría perderse por evaporación directa y transpiración de la vegetación si la disponibilidad de agua fuera ilimitada). La definición excluye las zonas hiperáridas, con un IA inferior a 0,05, pues considera que la actividad humana en estos territorios es escasa o nula. (Sin embargo, hay que tener en cuenta que las mejoras en los equipos de perforación y bombeo permiten la explotación de aguas subterráneas y el desarrollo de la agricultura de regadío, lo que hace posible que incluso los desiertos se desertifiquen.)

La importancia de las zonas áridas salta a la vista si se atiende a la población mundial que reside en ellas y las aprovecha: entre 2000 y 3000 millones de personas, de las cuales 1300 millones malviven en tierras degradadas. Es más, puesto que la presión demográfica va en aumento, en 2050 se estima que las ocuparán 4000 millones de personas. Otras magnitudes confirman la relevancia de las zonas áridas: el 30 por ciento de los cultivos se originó aquí; albergan el 36 por ciento de los depósitos de carbono y el 30 por ciento de las zonas forestales; y soportan el 50 por ciento de la ganadería mundial y el 44 por ciento de las tierras de cultivo.

Una confusión habitual es equiparar desertificación con zonas áridas. Como se desprende de la definición, el área desertificada es un subconjunto de las zonas áridas. No obstante, existe una gran variabilidad y ambigüedad en la cuantificación de las zonas áridas y las desertificadas.

Por un lado, la estimación de la superficie mundial de las zonas áridas respecto al total de las tierras emergidas fluctúa entre el 37,2 por ciento, según el Atlas Mundial de Desertificación (AMD), y el 46,7 por ciento, según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, aunque la cifra más aceptada es la de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, de las Naciones Unidas de 2005: el 41 por ciento.

La estimación de las zonas degradadas tampoco está bien resuelta, ya que por degradación se entienden muchas cosas. Existe cierto consenso de que entre un 10 y un 20 por ciento de las zonas áridas en el mundo ya están desertificadas. Sin embargo, resulta extremadamente complejo medir la degradación, puesto que es el resultado de diversos procesos que hasta la fecha no se han podido cuantificar de forma conjunta. Entre ellos figuran la salinización y la erosión del suelo, el agotamiento de las aguas subterráneas o la pérdida de biodiversidad. Este obstáculo ha desembocado en una nueva paradoja (estas abundan alrededor de la desertificación): el AMD contiene una variada cartografía en la que no hay un solo mapa de desertificación.



LAS ZONAS ÁRIDAS, que incluyen las regiones de clima árido, semiárido y seco-subhúmedo, abarcan una enorme proporción de las tierras emergidas en el mundo: alrededor del 40 por ciento. Una gran parte sufre riesgo de desertificación. (Se representan también las zonas de clima hiperárido, que incluyen los desiertos.)

«A SPATIAL ANALYSIS APPROACH TO THE GLOBAL DELINEATION OF DRYLAND AREAS OF RELEVANCE TO THE CBD PROGRAMME OF WORK ON DRY AND SUBHUMID LANDS», UNEP-WCMC, 2014).

La dificultad a la hora de definirla ha llevado al ecólogo James F. Reynolds, de la Universidad Duke, a presentar la desertificación como un «prisionero de la historia». La metáfora recoge de forma excelente los sesgos que históricamente ha ido adquiriendo el concepto. El término se empleó por primera vez en 1927 para describir la transformación de tierras productivas en desiertos como resultado del sobrepastoreo y otras actividades humanas en la zona forestal tropical de África. Esa visión colonialista, que culpaba a los nativos del avance del desierto, aún perdura. El segundo punto de inflexión de esta historia es la terrible hambruna que siguió a una de las peores sequías registradas en el Sahel, en los años setenta del siglo pasado. La catástrofe humanitaria fraguó la Conferencia Mundial de Desertificación de 1977, que añadió a la mala gestión del territorio otra causa de la desertificación: el clima. La Cumbre de Río de Janeiro de 1992 es el tercer remache de la prisión. Los Estados africanos lucharon por vincular desertificación con pobreza, sequías recurrentes e inseguridad alimentaria. Finalmente, en 1994, se ratificó la actual CNULD con el objetivo de «combatir la desertificación y mitigar los efectos de la sequía, sobre todo en África».

La principal consecuencia de esta deriva conceptual es el bloqueo al que ha estado sometida la implementación de soluciones. En efecto, las discusiones alrededor de la desertificación suelen empezar y terminar sobre qué es exactamente la desertificación. En 1987 había más de cien definiciones y, todavía hoy, es probable que cada experto en la materia aporte la suya. No es de extrañar que la relevancia de la CNULD y su interés público palidezcan en comparación con las otras dos Convenciones de la ONU (sobre la Diversidad Biológica y sobre el Cambio Climático). Al abarcar problemas tan diversos, la desertificación carece de un frente común y de un mensaje sintético claro.

Entender el problema

Es preciso conocer los procesos biofísicos y socioeconómicos que se entreveran en la desertificación para saber a qué nos enfrentamos y poder diseñar actuaciones viables y resolutivas.

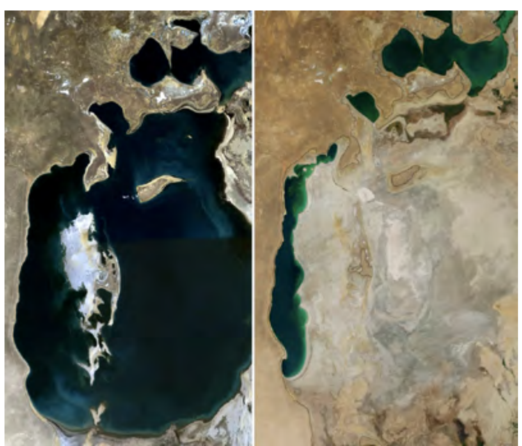
Las zonas áridas se caracterizan por una sucesión impredecible de ciclos productivos y épocas de carestía, lo que limita la dimensión de los sistemas socioecológicos que se instauran en ellas. Las sociedades de estos territorios son oportunistas y han sincronizado la actividad productiva con los episodios de precipitación. No es de extrañar que el uso prioritario del suelo, el 65 por ciento, sea el pastoreo. La movilidad de los rebaños resulta clave, ya que permite sacar el máximo partido de unos recursos muy variables. En cambio, la agricultura siempre ha estado a merced de las sequías; por eso el regadío ha sido considerado como motor de desarrollo. Pero la intensificación de la actividad agrícola en estas zonas se ha cobrado peajes demasiado caros, como ilustraremos a continuación.

Las innovaciones técnicas, la creación de infraestructuras, los períodos más húmedos de lo habitual o los planes de desarrollo estatales, en combinación con ese trasfondo oportunista al que aludíamos, han permitido trascender los límites que la naturaleza imponía. Pero, como sostenía el experto en zonas áridas del CSIC Juan Puigdefábregas, la desertificación se desencadena cuando los sistemas económicos no son capaces de reajustarse a las situaciones de escasez que siguen a los períodos de bonanza. Es entonces cuando la degradación alcanza umbrales irreversibles que la hacen permanente. Ese viaje hacia la insostenibilidad se mantiene con el aporte de suministros (agua y energía) que suplen los recursos propios de estas zonas. Es por ello por lo que a las zonas áridas se las considera sumideros financieros que tienden a vivir en un esplendor efímero.

Existen muchos casos de desertificación en el mundo con los que ilustrar este devenir. Mencionaremos dos de las mayores catástrofes ambientales de la historia. En las zonas áridas del Medio Oeste norteamericano, los bisontes que los indios cazaban para alimentarse y vestirse pastaban en praderas inmensas. La vida era dura, el viento soplaba impenitente y las sequías recurrentes, unidas a la pobreza del suelo, mantenían a raya la densidad de población y la salud de los ecosistemas. Pero hacia 1870, la invención del pesado arado de acero, que permitía roturar suelos protegidos por correosas capas de hierba, junto con la creación de una variedad de trigo resistente a la sequía y el frío, impulsaron la llegada de los colonos. Siguió un período excepcional de lluvias copiosas que dieron lugar a cosechas muy abundantes. A ello se sumó la subida del precio del trigo debido a la caída de las exportaciones rusas tras la revolución bolchevique. El resultado fue un éxito económico que



GEORGE E. MARSH, NOAA/WIKIMEDIA COMMONS (*tormenta de polvo*); NASA, FOTOMONTAJE DE PRODUCERCUNNINGHAM, WIKIMEDIA COMMONS (*mar de Aral*)



DOS SUCESOS HISTÓRICOS ofrecen ejemplos emblemáticos de desertificación, según muestran las imágenes. Durante el episodio del Dust Bowl, una tormenta de polvo asolaba una zona de Stratford, Texas, en 1935 (*arriba*). En la Unión Soviética, la sobreexplotación del agua de los ríos para regar los cultivos de algodón redujo notoriamente la superficie del mar de Aral entre 1989 (*abajo, izquierda*) y 2014 (*abajo, derecha*).

atrajo a miles de granjeros. Pero cuando, en 1931, reaparecieron la sequía y los fuertes vientos, se produjo una erosión eólica sin precedentes. El suelo desnudo y desmenuzado voló, literalmente, por los aires. Ese suceso devastador, conocido como Dust Bowl («cuenco de polvo»), afectó a más de dos millones de hectáreas y provocó la emigración de tres millones y medio de personas.

El segundo caso de desertificación no es menos calamitoso. En el pasado, el mar de Aral, situado entre Kazajistán y Uzbekistán, era uno de los cuatro lagos salados más grandes del mundo, con 68.000 kilómetros cuadrados de extensión. La industria pesquera procuraba 60.000 empleos y producía 40.000 toneladas anuales de pescado. Pero en los años sesenta, el Gobierno soviético decidió poner en marcha un ambicioso proyecto con el objetivo de que el país fuese autosuficiente en la producción de algodón. El plan consistía en regar cuanta superficie fuese necesaria con las aguas de los ríos que alimentaban el Aral. Al secarse los ríos, el nivel del mar empezó a descender unos veinte centímetros al año durante la primera década y unos sesenta la siguiente. Finalmente, en la década de los ochenta, llegó a descender casi noventa centímetros al año. Eso sí, la producción de algodón se duplicó. Pero mientras la Unión Soviética se acercaba a su ambicioso objetivo, la falta de agua en los ecosistemas y la sobreexplotación agrícola empezaron a revelar unas consecuencias devastadoras. La superficie del lago se redujo tanto que hoy es

menos del 10 por ciento de la original. Al quedar expuesto el lecho marino, los fuertes vientos de la región fueron esparciendo la sal por los campos de alrededor, lo que condenó la agricultura al ostracismo. A cambio del algodón se acabó la pesca, la agricultura y la gente, que emigró a otros lugares más habitables.

La desertificación es, pues, el resultado de procesos económicos desencadenados por una mezcla de factores tecnológicos, sociales y políticos que actúan de forma sinérgica con las variaciones climáticas (sequías, períodos húmedos). Dicho esto, es necesario tener en cuenta, a la hora de proponer soluciones, que algunos factores de degradación lo son también de desarrollo económico, por lo que las intervenciones que solo persiguen beneficios ambientales pueden conllevar perjuicios económicos.

¿Se está desertificando España?

La desertificación no es un proceso circunscrito a territorios remotos. España es el país de Europa más afectado: el 73,7 por ciento de su superficie es árida (es decir, presenta clima árido, subárido o seco-subhúmedo) y el 20 por ciento ya está desertificado. Puesto que nuestro país es signatario de la CNULD, el Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente elaboró en 2008 un Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND).

El programa realizó un diagnóstico de las situaciones vulnerables. A partir de una combinación de variables biofísicas y socioeconómicas, identificó unos paisajes de desertificación, o «puntos calientes». Señalaba las causas del proceso y sentaba las bases a la hora de concebir soluciones. El objetivo era anticiparse a las amenazas que revelaban ciertos indicadores, como el crecimiento de la superficie de regadío, la disminución de las precipitaciones o los cambios en la población. Ese diagnóstico (diseñado en el proyecto SURMODES, encabezado por Puigdefábregas) se anticipaba en casi dos décadas al planteamiento propuesto por el AMD (conocido como «Convergencia de evidencias»).

Cuatro de los «paisajes de la desertificación» identificados por el PAND corresponden a zonas donde los procesos de degradación ecológica están activos, mientras que el quinto recoge aquellas áreas donde la desertificación es relicta, es decir, atestigua antiguos procesos de degradación hoy inactivos.

Este último paisaje, que engloba más de 2 millones de hectáreas, nos brinda una enseñanza clave: cuando se sobrepasan determinados umbrales de degradación, la recuperación de esos territorios es muy lenta y en algunos casos inviable. Pensemos que, cuando una zona montañosa pierde la cubierta vegetal (a causa de los incendios forestales, la recolección de leña o la tala de árboles) y después llueve torrencialmente (un fenómeno cada vez más frecuente debido al cambio climático), la capa de suelo fértil, que tarda siglos en formarse, es arrastrada ladera abajo. Ello tiene repercusiones nefastas, ya que sobre un suelo paupérrimo de espesor ínfimo no crece un bosque.

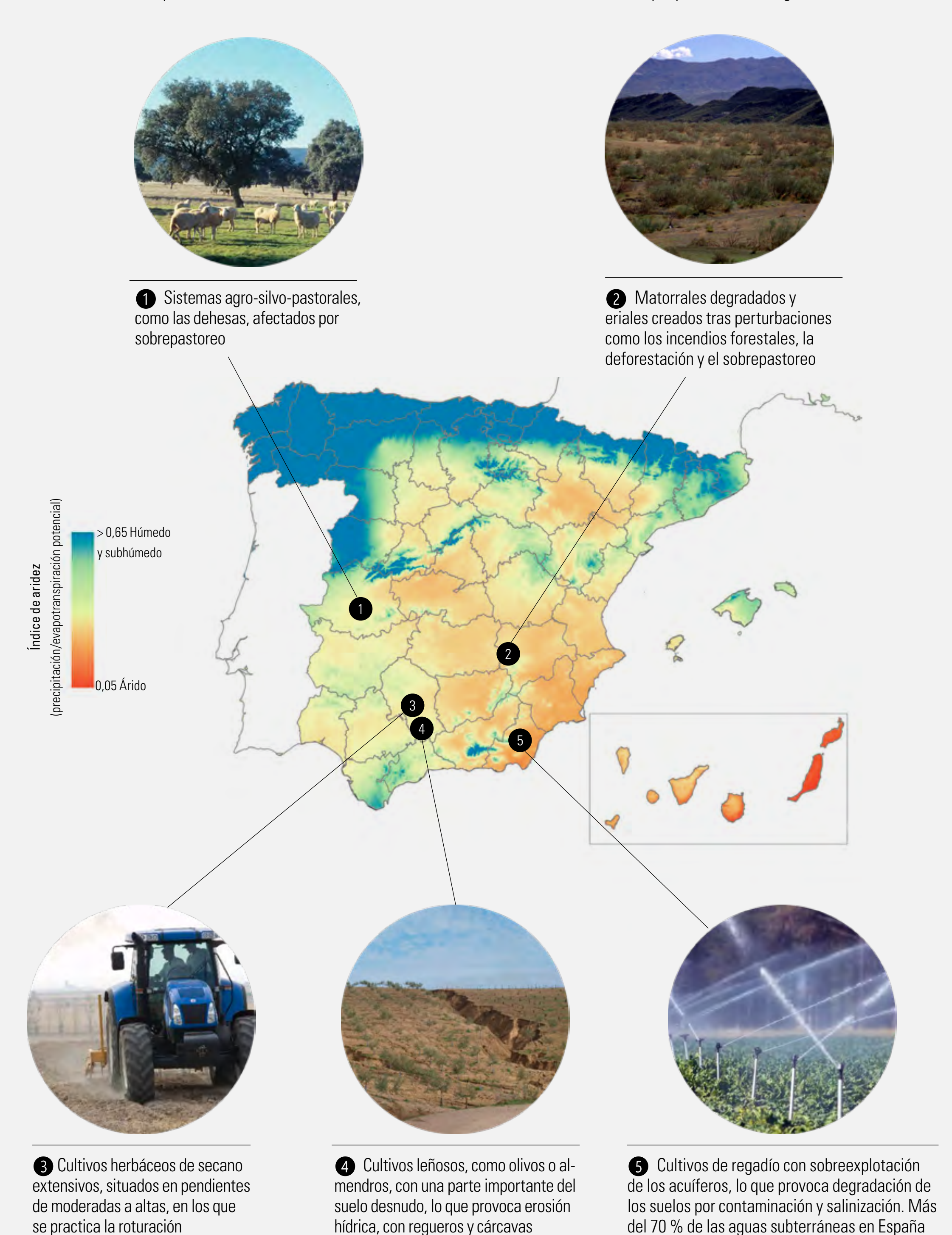
Aunque el PAND acertó en su diagnóstico, la desertificación en España ha seguido agravándose, y en las dos primeras décadas del siglo xxi se ha consolidado un modelo agroalimentario cuya dinámica ha empeorado los procesos de desertificación identificados por el programa. Pese a su valor científico, el PAND carecía de un plan de acción adecuado. No aportaba una verdadera estrategia con objetivos, asignación de tareas y plazos para poder atajar el problema. Esa inacción, junto con las tendencias del sector agrario, han expandido y agudizado la desertificación en nuestro país. A pesar de que la superficie agraria ha disminuido un 9 por ciento entre 2000 y 2020, la de regadío ha aumentado un 12 por ciento y ha superado los 3,8 millones de hectáreas, según el Anuario de Estadística del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

En una parte del territorio ha aumentado la presión sobre unos recursos hídricos cada vez más escasos (debido a la creciente aridez que impone el cambio climático) y más demandados; y, al mismo tiempo, el abandono del campo ha venido vaciando los paisajes creados por la intervención humana. De este modo, aunque el declive de la ganadería extensiva y el abandono de los cultivos han supuesto la regeneración de la masa forestal en las zonas desocupadas, ello ha tenido una serie de contrapartidas. Una de ellas es el crecimiento desordenado de la vegetación en esas zonas, un fenómeno que ha favorecido los incendios forestales de grandes proporciones.

Además, la ganadería no ha desaparecido, sino que se ha recluido en naves en las que se ha consolidado el modelo intensivo iniciado en los años ochenta. El consumo masivo de piensos se traduce, por una parte, en la deforestación de ecosistemas lejanos. En un estudio reciente estimamos que, entre 2000 y 2010, se han deforestado 1.220.000 hectáreas de la Amazonía, el Chaco

Los paisajes de la desertificación

Las zonas áridas, caracterizadas por un déficit hídrico, ocupan el 74 por ciento del territorio español, y el 20 por ciento de ellas están afectadas por la desertificación. Esta se produce cuando se reúne una serie de factores desfavorables, tanto biofísicos (pendientes elevadas, suelo erosionable, vegetación rala, alta incidencia de sequías, incendios forestales y lluvias torrenciales, etc.) como socioeconómico (agricultura o ganadería intensivas, sobreexplotación de acuíferos, alta presión demográfica, etc.). Abajo se ilustran los paisajes de desertificación más representativos del país, identificados en 2008 por el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación. Por desgracia, el diagnóstico que hizo el programa no fue acompañado de soluciones efectivas y el problema se ha agravado.



❶ Sistemas agro-silvo-pastorales, como las dehesas, afectados por sobrepastoreo

❷ Matorrales degradados y eriales creados tras perturbaciones como los incendios forestales, la deforestación y el sobrepastoreo

❸ Cultivos herbáceos de secano extensivos, situados en pendientes de moderadas a altas, en los que se practica la roturación

❹ Cultivos leñosos, como olivos o almendros, con una parte importante del suelo desnudo, lo que provoca erosión hídrica, con regueros y cárcavas

❺ Cultivos de regadío con sobreexplotación de los acuíferos, lo que provoca degradación de los suelos por contaminación y salinización. Más del 70 % de las aguas subterráneas en España se utiliza para la agricultura

«GLOBAL ARIDITY INDEX AND POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION (ET0) CLIMATE DATABASE V3», ANTONIO TRABUCCO Y ROBERT ZOMER EN FIGSHARE, 2022 (MAPA DE ARIDEZ); CENTRO NACIONAL DE EDUCACIÓN AMBIENTAL, J.A. GÓMEZ Y G. DEL BARRIO (*fotografías*)

y el Cerrado brasileño para cultivar la soja que consume la ganadería estabulada en España. Por otra parte, los residuos que genera el ganado son vertidos en muchos casos sin tratamiento alguno, lo que contamina de forma importante las aguas subterráneas. Estos vertidos también proceden de la agricultura intensiva y hieren de gravedad el entorno, incluidos algunos parajes naturales emblemáticos, según hemos comprobado en el Mar Menor, en Murcia.

El auge de la agricultura y la ganadería intensivas de las últimas décadas en España está creando nuevos paisajes de desertificación y consolidando los ya detectados en el pasado. Ello ha obligado al Gobierno español a actualizar la Estrategia Nacional de Lucha contra la Desertificación, aprobada el pasado junio. Es una buena oportunidad para enmendar los errores cometidos y lanzar un verdadero plan que desactive las amenazas de la desertificación.

Frenar la degradación sin penalizar el desarrollo

La lucha contra la desertificación ha resultado inefectiva en todo el mundo. Conscientes de ello, la CNULD lanzó una iniciativa que busca la Neutralidad en la Degradación de las Tierras (LDN, por sus siglas en inglés). Se aprobó en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible («Río+20»), y posteriormente fue engarzada en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en concreto, en el objetivo 15.3: «De aquí a 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con efecto neutro en la degradación del suelo».

La LDN es una iniciativa ambiciosa que trasciende las zonas áridas, lo cual cobra sentido en un mundo cada vez más globalizado en el que no parece lógico compartimentar lo que ocurre en cada bioma, pues todos están conectados. Además, es realista: reconoce que es inevitable la degradación del medio, pero sostiene que es factible compensarla mediante la conservación y la restauración del territorio. Prioriza ante todo la prevención, porque considera que recuperar el estado original de un ecosistema es prácticamente imposible y conllevaría costes exagerados.

Por un lado, aboga por prácticas de gestión sostenible de la tierra, que exploten el terreno de forma que se preserven servicios ambientales básicos. El cultivo en franjas o el arado que sigue las curvas de nivel son una pequeña muestra de las 1740 prácticas propuestas. Por otro lado, propugna la restauración ecológica de las zonas deforestadas. La recuperación de la cubierta vegetal debe tener en cuenta las características ecológicas del lugar, de modo que las especies forestales que se introduzcan arraiguen y no alteren el balance hídrico ni otras propiedades del ecosistema; además, los proyectos de restauración deben integrar la opinión y las necesidades de la población local.

La LDN remarca que no vale cualquier tipo de compensación. Esta debe darse entre territorios con las mismas características biofísicas y durante el mismo período de tiempo. Por ejemplo, el deterioro que se produzca en un ecosistema mediterráneo no puede compensarse con planes de reforestación en ambientes tropicales.

De hecho, la restauración ecológica se está convirtiendo en la solución predominante. Al coincidir con las medidas propuestas para combatir el cambio climático, se ha configurado un marco muy favorable para su financiación. Iniciativas como el Decenio de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas, que abarca de 2021 a 2030, es una prueba de ello. Las reforestaciones, que perseguían sobre todo recubrir con rapidez un territorio simplemente con árboles, han derivado en restauraciones ecológicas, que promueven una visión mucho más holística del territorio.

La iniciativa más ambiciosa en este nuevo marco es la Gran Muralla Verde del Sahara y el Sahel. Con una inversión multimillonaria, pretende crear una franja vegetal de 8000 kilómetros entre Senegal a Yibuti. Este megaproyecto ha tomado nota de los errores del pasado. Por un lado, se desmarca de las reforestaciones entendidas como infraestructuras que contienen el avance del desierto. Por otro, bebe de iniciativas locales, como los *zai* de Níger y Burkina Faso, una técnica tradicional que consiste en una retícula de hoyos de plantación profundos practicados en suelos compactos, que mejoran la infiltración y la retención del agua durante los períodos secos. El fin último de la muralla es crear un mosaico vegetal con diversas especies que proporcione distintos servicios ambientales, como alimento, combustible, sombra, conservación de agua, depósitos de carbono y protección del suelo. Pretende mejorar las condiciones de vida de las personas sin que el medio se degrade.

La LDN está impregnada de un marcado carácter ambientalista y prima limitar la degradación. Sin embargo, otras corrientes en la CNULD abogan por políticas de desarrollo y por la intensificación del uso del suelo para atajar problemas tan acuciantes como el hambre, la pobreza o el acceso al agua potable. Se argumenta que solo es posible detener la espiral de degradación que implica vivir de unos recursos famélicos si se promueve el desarrollo de estas zonas. El regadío se ha consolidado como la principal herramienta para alcanzar esas metas. Ello ha derivado en el deterioro de las aguas subterráneas en todas las zonas áridas, ya que su tasa de recarga no alcanza a cubrir las extracciones.

La solución no es trivial, puesto que la falta de desarrollo conlleva desertificación, pero su exceso también. La misma tensión se percibe a la hora de abordar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en los que unos se alcanzan ralentizando la actividad económica, mientras que otros solo se logran con desarrollo económico.

Desde nuestro punto de vista, para manejar este equilibrio es esencial una buena gobernanza. Las estrategias locales o nacionales (la LDN se implementa a escala nacional) deben conjugarse con las globales para lidiar con problemas que traspasan las fronteras. El hecho de que más de un tercio de los alimentos se pierda por el camino entre el lugar de producción y los consumidores debe hacer reflexionar sobre la necesidad de roturar nuevas tierras para el cultivo. Además, la creciente distancia entre los centros de producción y los puntos de consumo, un fenómeno conocido como teleacoplamiento, distorsiona el propósito de la LDN, puesto que significa que la huella ambiental de un país se traslada a otros.

Perspectivas futuras

La importancia de las zonas áridas queda patente al considerar la superficie que ocupan y la población que albergan. Conocerlas bien es esencial para salvaguardar los procesos ecológicos que las mantienen vivas. A fin de protegerlas, es necesario que la actividad económica aprenda a adaptarse, una y otra vez, a las posibilidades que brinda el entorno, unas posibilidades que se van reduciendo a causa del cambio climático.

Es necesario seguir clarificando el concepto de desertificación y explicar la dinámica interna del proceso. Así evitaremos caer en la simplicidad de que la desertificación es el avance del desierto o de que está vinculada en exclusiva a las sequías. Pero no bastará con eso. Además, es urgente proponer soluciones verdaderamente efectivas y transformadoras. La LDN es el vehículo elegido por la CNULD para canalizar, ante todo, las propuestas que eviten la degradación, pero también las que la reviertan y la reduzcan. En este sentido, la restauración ecológica se está convirtiendo en el emblema de la lucha contra la desertificación y el cambio climático. La LDN debe de ser, en el fondo, una herramienta de ordenación del territorio que no desperdicie recursos, los sepa reutilizar y modere sus pautas de consumo. Para todo ello, la gobernanza que se establezca, que deberá abarcar de lo global a lo local, es un instrumento primordial para armonizar la diversidad de intereses y puntos de vista que cohabitan en las zonas áridas.

Jaime Martínez-Valderrama, investigador del Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio Ramón Margalef (IMEM), en la Universidad de Alicante, es experto en desertificación y modelos de simulación. Además, es escritor y divulgador científico.



Emilio Guirado investiga el funcionamiento y la biodiversidad de los ecosistemas mediante inteligencia artificial en el IMEM.



Fernando T. Maestre es experto en ecología de zonas áridas, desertificación y cambio climático en el IMEM y el Departamento de Ecología de la Universidad de Alicante.



PARA SABER MÁS

Los desiertos y la desertificación. Jaime Martínez-Valderrama, Ediciones Catarata, Madrid, 2016.

Desertificación: nuevos enfoques para un viejo problema. Jaime Martínez-Valderrama, Emilio Guirado y Fernando T. Maestre (eds.). *Revista Ecosistemas*, vol. 30, n.º 3, septiembre-diciembre de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

La desertificación en el sudeste ibérico. Juan Albaladejo Montoro en *IyC*, junio de 2014.

El riesgo de la desertificación. Fernando T. Maestre en *IyC*, julio de 2018.

Arida cutis: un blog sobre ecología de las zonas áridas. Fernando T. Maestre, Santiago Soliveres y Jaime Martínez Valderrama en SciLogs de *IyC*.



EDUCACIÓN

DESINFORMACIÓN CLIMÁTICA EN LA ESCUELA

Katie Worth | Así manipulan las empresas gasísticas y petrolíferas lo que se enseña en las aulas y libros de texto de Estados Unidos, de preescolar a secundaria

TAYLOR CALLERY

En una monótona sala de audiencias en Austin, Texas, los miembros de la Junta Estatal de Educación, sentados en pequeños pupitres suficientemente separados unos de otros y dispuestos de tal forma que componían un círculo amplio, debatían sobre si los estudiantes de ciencias de secundaria deberían estar obligados a conocer «los esfuerzos que deben realizarse para mitigar el cambio climático». Uno de esos miembros, un profesor de ciencias que llevaba toda la vida dando clases en una escuela pública, se postuló a favor de la medida. Otro, abogado de la compañía petrolífera Shell, propuso que se eliminara ese contenido.

Ganó el abogado. Al final, la junta decidió que los alumnos de ciencias de secundaria estudiaran, en su lugar, «el ciclo del carbono».

Durante los dos últimos años, en las reuniones de las juntas de educación de todo Estados Unidos se han oído protestas contra las mascarillas o las listas de lectura y se ha debatido sobre si se debe prohibir la educación sobre el racismo estructural. En Texas, se respiraba una agenda política más tranquila, en la reunión con poca asistencia que se celebró para elaborar las directrices curriculares para la educación científica (las guías que definen qué deberían aprender los estudiantes en cada asignatura y curso). Por primera vez, la Junta Estatal se había planteado exigir a los estudiantes que aprendieran algo sobre el cambio climático antropogénico. Esta propuesta originó una tensa disputa entre los representantes de la industria, interesados en fomentar las actitudes positivas frente a los combustibles fósiles, y los defensores de la educación, que piensan que los estudiantes deben aprender la ciencia que subyace a la crisis climática que se desarrolla a su alrededor.

La adopción de las directrices curriculares constituye un ejercicio de burocracia, pero los resultados influyen sobremanera en lo que se enseña en las aulas. Las editoriales las consultan cuando han de escribir sus libros de texto. Los funcionarios de educación las utilizan a la hora de elaborar sus pruebas. Los distritos escolares recurren a ellas para elaborar sus planes de estudio. Lo mismo hacen los profesores cuando diseñan sus asignaturas. Cada estado adopta sus propias directrices, pero hace mucho tiempo que las aprobadas por Texas tienen una influencia que traspasa las fronteras del estado.

EN SÍNTESIS

En EE.UU., la población general y los docentes piensan que en las escuelas debería enseñarse la ciencia que subyace a la crisis climática. La industria energética, en cambio, trata de impedirlo.

En Texas, el Consejo de Energía, una coalición que agrupa a las empresas gasísticas y petroleras, participa en la elaboración de las directrices curriculares de ciencias. Su propósito es fomentar el inactivismo y las actitudes positivas frente a los combustibles fósiles.

Dado que Texas es el estado en que más libros de texto se venden, los editores elaboran los materiales educativos acorde con las directrices tejanas, tradicionalmente conservadoras. Puesto que estos libros se venden luego en muchos otros estados, ello acaba condicionando lo que se enseña en las aulas de todo el país.

En 2020, dos importantes grupos que trabajan por la defensa de la educación, el Centro Nacional para la Educación Científica y la Red de Libertad de Texas, contrataron a expertos para evaluar los currículos científicos de los 50 estados, además de Washington, D. C., basándose en cómo se trataba la crisis climática. Treinta estados y la capital sacaron un «sobresaliente» o un «notable». Texas fue uno de los seis estados cuya nota fue un «muy deficiente». Pero, como Texas es uno de los estados donde se compran más libros de texto de todo el país —y dado que los quince miembros electos de su Junta Estatal de Educación tradicionalmente han adoptado un punto de vista conservador en esos libros de texto—, los editores prestan mucha atención a las directrices decididas en Texas cuando crean los materiales que luego venden a las escuelas de todo el país. Una vez, un antiguo editor de libros de texto de ciencia me comentó: «Nunca he oído decir explícitamente a nadie “no podemos hablar de ecologismo por culpa de Texas”, pero es algo que todos sabemos». De esta forma, lo aprobado en una sala de juntas de Austin influye en lo que se enseña a millones de niños de todo el país.

La mayoría de estadounidenses desean que a sus hijos se les enseñe todo lo relacionado con la crisis climática. Según una encuesta nacional realizada en 2019 por NPR/Ipsos, casi cuatro de cada cinco encuestados (incluso dos de cada tres republicanos), pensaban que los escolares deberían estudiar el cambio climático. Cuando

la Agencia de Educación de Texas preguntó a los profesores de ciencias de todo el estado qué debería añadirse a los programas educativos, uno de cada cuatro respondió que había que incluir el cambio climático o algo relacionado, como las energías alternativas. Nadie pidió más contenido sobre los combustibles fósiles.

Y, sin embargo, después de ver cuarenta horas de sesiones de la junta en directo y grabadas, de revisar decenas de registros públicos y de entrevistar a quince personas involucradas en la elaboración de las directrices curriculares, me di cuenta de que la industria de los combustibles fósiles participaba en cada etapa del proceso de decisión sobre qué temáticas de ciencia se estudiarían en Texas, trabajando para influir a su favor en los temas que debían estudiar los niños y niñas del país. El departamento de educación tejano reunió equipos de voluntarios para reescribir las directrices existentes, y los miembros de la industria fueron los primeros en ofrecerse para influir en todo lo relacionado con la energía y el clima. Cada vez que se celebraba una audiencia pública para revisar las directrices que deberían adoptarse, allí estaban para testificar. Cuando la junta se reunió para la aprobación final de las nuevas directrices, la industria hizo un llamamiento a sus miembros para que promovieran sus propuestas, lo que provocaría que el drama aparentemente local que se vivía en Austin afectase al resto del país.


TAYLOR CALLERY

Durante al menos un decenio, la industria de los combustibles fósiles ha intentado lavar su imagen pública en lo referente al medioambiente. Pero lo aprobado en Texas muestra que sus acciones no siempre reflejan esa pretendida nueva imagen. En lugares con menos atención mediática, la industria sigue restando importancia a la crisis que ha provocado, oponiéndose a las iniciativas que pretenden que se enseñe la ciencia relacionada con esa crisis a la nueva generación, cuyo mundo se verá condicionado por ella.

LA ÚLTIMA VEZ que la junta revisó los Conocimientos y Competencias Esenciales de Texas (TEKS,

por sus siglas en inglés) para ciencias, en 2009, estaba dirigida por Don McLeroy, odontólogo del centro-este de Texas. McLeroy dejó clara su opinión sobre la educación científica cuando declaró en una reunión: «¡Alguien tiene que enfrentarse a los expertos!». La junta pasó gran parte de ese periodo discutiendo sobre evolución, pero también pretendía que los estudiantes de ciencias ambientales de secundaria debatieran algo que los científicos no habían debatido durante mucho tiempo: si el calentamiento global era algo real. McLeroy le contó a un periodista que estaba muy contento porque «los conservadores como yo pensamos que las pruebas aportadas no son más que un montón de tonterías».

A finales de 2019, cuando llegó el momento de iniciar otra revisión, McLeroy ya se había ido. La junta dejó claro a los 85 voluntarios reclutados por la Agencia de Educación de Texas para redactar las nuevas directrices que esperaba que no hubiera más polémica sobre la evolución. Pronto quedó claro que el grupo se centraría en el cambio climático.

Para empezar, los miembros de la junta dividieron el programa en tres tramos, que se iban a analizar de uno en uno: primero, las ciencias troncales de secundaria; luego, las ciencias optativas de secundaria y, por último, las ciencias en el tramo K-8 (conjunto de etapas escolares que abarca de los 5 a los 13 años de edad). De cada tramo se iban a encargar equipos de redacción compuestos por voluntarios. Los asesores profesionales, la mayoría nombrados por los miembros de la junta, proporcionarían a los equipos de redacción información sobre los cambios propuestos.

Durante el verano de 2020, un equipo se encargó del primer tramo, las asignaturas correspondientes a la educación secundaria: biología, química, física y una asignatura conjunta de física y química. Era importante saber qué directrices debían seguir esas asignaturas científicas por dos razones. El número de alumnos que se apuntaban a esas clases era altísimo (cada año, casi medio millón de estudiantes optaba por biología). Y lo que ocurriera allí definiría el «tono» de las optativas de secundaria y en K-8. Cuando la Junta de Educación de Texas publicó los resultados de los grupos en su página web, en julio de 2020, los defensores de la educación climática pudieron comprobar que el proyecto no contenía ni una sola referencia al cambio climático actual. Pero todavía quedaba una oportunidad para arreglar esa omisión. La junta estatal sometería a debate público las directrices curriculares planeadas y se permitiría la presentación de enmiendas.

La primera gran audiencia se celebró en septiembre de 2020, tanto de forma presencial como virtual (a través de Zoom), debido a la pandemia de COVID-19. Testificaron más de treinta profesores, progenitores y otros defensores de la educación que aseguraron que había aspectos biológicos, químicos y físicos de la crisis climática que la convertían en un tema relevante para las clases de ciencias. Sin embargo, después de tres horas y media de reunión, apareció en la pantalla de Zoom alguien con una opinión muy diferente: Robert Unger, ingeniero veterano de Dallas que había trabajado para la industria petrolífera y gasística durante más de 45 años. Participaba en representación del Consejo de Energía de Texas y tenía algunas sugerencias.

El Consejo de Energía de Texas es una coalición compuesta por unas 35 organizaciones de la industria, sobre todo del sector petrolífero y gasístico, a la que pertenecen, en total, más de 5000 miembros. Algunos meses antes, el consejo empezó a reclutar a voluntarios para que participasen en la elaboración de los programas educativos. En la web del consejo se podía leer que «las ciencias de la Tierra y, en particular, la industria petrolífera y del gas, han disminuido su presencia en el programa de estudios de las escuelas primaria y secundaria desde hace tiempo». Con la esperanza de revertir esa situación, el consejo fichó a 17 personas, incluidos geocientíficos, ingenieros petrolíferos, profesores, abogados y otros especialistas en combustibles fósiles, que, según esa misma web, «compartían el mismo objetivo: asegurarse de que todo lo relacionado con el petróleo y el gas se presentase de forma equilibrada, recalcando su contribución fundamental a la matriz energética de Texas, Estados Unidos y el mundo». Unger ayudó a organizar a los voluntarios. (He de decir que varios miembros de la organización, incluido el propio Unger, rechazaron ser entrevistados para este artículo. En un intercambio de correos electrónicos, Michael Cooper, presidente del consejo, leyó mis conclusiones, pero dijo que no podía dar una respuesta sin revisar antes un borrador completo.)

Unger pidió a la junta que retirase una línea del material introductorio para cada una de las clases troncales de la escuela secundaria en la que se analizaba la justicia social y la ética, términos,

según Unger, «ajenos al material del curso». En cambio, dijo, se debería incluir el concepto de análisis coste-beneficio.

La mayoría de los miembros de la junta apenas mostraron reacción alguna ante las numerosas personas que testificaron a favor de la educación climática, pero la declaración de Unger atrajo la atención de, entre otros, la republicana Barbara Cargill, antigua profesora de biología en el norte de Houston que estaba finalizando su trabajo en el consejo. Preguntó a Unger cómo podría incorporarse el análisis de costes y beneficios al programa educativo estatal. Este respondió con un ejemplo: el principal beneficio de los combustibles fósiles es la energía que producen y los costes son «todos esos asuntos ambientales que nuestra industria ya está regulando». También recalcó que el petróleo y el gas no eran los únicos combustibles con un coste. Y pasó a hablar de la energía solar: «Parece ser que los beneficios son maravillosos, pero también tiene costes, como la extracción de minerales conocidos como tierras raras para fabricar baterías. Y lo mismo ocurre con la energía eólica. Tiene beneficios y costes». Un profesor de ciencias podría analizar estos temas con sus alumnos «y no las ambigüedades de la injusticia y la ética sociales». Cargill prometió estudiar la propuesta de Unger.

Todas las fuentes de energía acarrean costes. Pero la obsesión por los «análisis de costes y beneficios» es uno de los fundamentos en los que se apoya lo que el climatólogo Michael Mann ha llamado «inactivismo»: una táctica que no niega el cambio climático antropogénico, pero lo minimiza, desvía la culpa y trata de retrasar las acciones para paliarlo. Según esta forma de pensar, los combustibles fósiles tienen consecuencias perjudiciales, pero ¿existe alguna forma de energía que no las tenga? Mann y otros expertos han criticado esos argumentos, dado que se basan en equivalencias falsas: los costes ambientales y los relacionados con la salud que tienen las tierras raras necesarias para ciertas fuentes de energía renovables son pequeños en comparación con los de los combustibles fósiles.

Al día siguiente, cuando la junta se volvió a reunir para considerar las enmiendas a las directrices curriculares, Cargill propuso eliminar la justicia social y añadir el análisis coste-beneficio. Su compañera republicana Pat Hardy, profesora de historia retirada y desarrolladora de planes de estudios que representaba a los suburbios cercanos a Dallas-Fort Worth, apoyó con entusiasmo esa modificación. «La gente cree que los coches eléctricos van a ser la salvación del universo. Y se equivoca», comentó Hardy en una intervención que quedó registrada en vídeo. La junta votó la aceptación de los cambios propuestos. Fue la primera gran victoria del Consejo de Energía de Texas.

El último día de las audiencias públicas, los defensores de la inclusión de la crisis climática en los planes de estudio obtuvieron una victoria. Marisa Pérez-Díaz, miembro de la junta directiva del partido demócrata de San Antonio y la más joven en ser elegida para el consejo de educación de un estado, había escuchado todas las solicitudes. Propuso añadir la frase «y el cambio climático global» al final del texto de una directriz en la que se pedía a los alumnos que examinaran una variedad de impactos causados por el hombre en el medio. Sorprendentemente, la junta aceptó la moción. No fue una gran victoria; esa frase se incluyó solo en la directriz de una asignatura, la de física y química, a la que suelen asistir solo una quinta parte de los estudiantes que han elegido biología. Pero, para los que defendían la inclusión de este tema en el currículo, fue un motivo de esperanza, un pequeño paso adelante.

DURANTE LOS MESES POSTERIORES, cuando la junta analizó los dos tramos siguientes (las optativas científicas de secundaria y las ciencias en K-8), los voluntarios del Consejo de Energía de Texas intervinieron en todas las reuniones. Propusieron algunos cambios que los defensores de la educación climática encontraron razonables, como exigir a los alumnos que aprendan las leyes de la geología y que se fomente el uso de recursos educativos como los museos y la ayuda de tutores. Pero insistieron en incorporar a los nuevos programas el tema del análisis de costes y beneficios, y, además, añadieron nuevas peticiones. Por ejemplo, querían eliminar los términos «renovable» y «no renovable» en las descripciones de las diferentes fuentes de energía; preferían describir todas las opciones como «recursos naturales». Y en su discurso recurrían con frecuencia a la pobreza energética, la falta de acceso a una electricidad asequible. «Aunque se habla poco de ello, la pobreza energética es uno de los peligros más graves a los que se enfrenta la humanidad», declaró en una de las reuniones Jason Issac, director de una iniciativa energética puesta en marcha por un laboratorio

de ideas (*think-tank*) conservador. Solo sugirió una solución: «Aquí mismo, en Texas, la clave para acabar con la pobreza energética global se encuentra bajo nuestros pies».

Los defensores de la educación climática que formaban parte de la junta daban por hecho que perderían algunas batallas. Pero esperaban que los voluntarios del Consejo de Energía de Texas no se opusieran a la incorporación de información clara sobre la ciencia de la crisis climática. Durante las deliberaciones posteriores, quedó bien claro que no sería así.

En enero de 2021, la junta celebró las primeras audiencias para tratar las asignaturas optativas de secundaria: ciencias ambientales, ciencias acuáticas, ciencias de la Tierra y astronomía. Los estudiantes eligen menos estas asignaturas que biología, química o física, pero los programas de los cursos de ciencias de la Tierra y de ciencias ambientales eran los únicos en los que ya se mencionaba el cambio climático.

En los meses previos a la celebración de las audiencias, las 23 personas de los equipos de redacción de las asignaturas optativas se reunieron cada dos semanas para redactar las nuevas directrices. Hasta entonces, se pedía a los alumnos que estudiaban ciencias de la Tierra que «analizaran la relación empírica entre la emisión de dióxido de carbono, los niveles de dióxido de carbono atmosférico y la tendencia que ha seguido la temperatura global media durante los últimos 150 años», un periodo que empezaba en la industrialización y durante el cual los niveles de dióxido de carbono se dispararon. Ese lenguaje no le parecía correcto a William J. Moulton, geofísico de la industria petrolífera. Respaldado por el Consejo de Energía de Texas y acompañado por otros representantes de la industria, solicitó a la Agencia de Educación de Texas formar parte de uno de los grupos de redacción. Fue colocado en el equipo que reescribía los cursos de ciencias de la Tierra y astronomía.

Moulton aceptó que se mencionara el cambio climático, ya que, de una u otra forma, los estudiantes oirían hablar de él. Pero no estaba de acuerdo en que se les hiciera creer que existía un consenso científico al respecto. Planteó la retirada de la frase «los últimos 150 años». El grupo aceptó ese y otros «ajustes lingüísticos» de Moulton. Cuando esas directrices diluidas llegaron a la junta en enero, otros cuatro voluntarios del Consejo de Energía de Texas aparecieron en la reunión vía Zoom y recomendaron la modificación. Uno de los asistentes dijo que deberían centrarse en los peligros de las tierras raras, otro añadió que era muy importante que los niños aprendieran que el inicio de la industria de los combustibles fósiles puso fin a la práctica de la caza de ballenas con la que se obtenía la grasa que luego transformaban en combustible. Aseguró que «el petróleo y el gas salvaron, literalmente, a las ballenas».

La industria también colocó a un nuevo defensor en la junta: Will Hickman, quien acababa de ser elegido en noviembre de 2020 por un distrito de las afueras de Houston. Su experiencia en el campo de la educación se limitaba a participar en las asociaciones de padres de los colegios de sus hijos, entrenar a equipos deportivos y enseñar en la escuela dominical. Desde 2004 mantenía el mismo puesto: asesor jurídico principal de Shell Oil.

En la audiencia de enero, la primera a la que acudió Hickman, su pregunta inicial fue en qué parte de las directrices propuestas aparecían las ventajas y desventajas de las diversas formas de energía. Al día siguiente, puso un ejemplo que debería ser escuchado en clase: «Todo el mundo cree que las energías renovables son una gran idea, y Alemania las adoptó a gran escala. Pero el coste-beneficio acabó provocando una subida del precio de su energía y ahora es unas 2,5 veces superior al nuestro».

Los comités encargados de la redacción de las directrices curriculares ya habían incluido una referencia al análisis de costes y beneficios en la sección dedicada a las «prácticas científicas y de ingeniería» de cada una de las asignaturas optativas, y ahora también se mencionaba en la asignatura de ciencias ambientales. Pero en las posteriores audiencias de la junta, celebradas en abril, Hickman presionó para que se incluyeran más. Otro miembro, Rebecca Bell-Metereau, profesora de inglés y cinematografía en la Universidad Estatal de Texas, elegida para representar a Austin, se opuso: «La expresión “costes y beneficios” coloca el énfasis principal en el dinero, no en la sociedad, el bienestar o la salud de las personas». Sin embargo, la junta aprobó la moción de Hickman de añadir otra mención más a los costes y beneficios, en este caso, en las ciencias acuáticas.

Moulton volvió a aparecer en las audiencias de la junta proponiendo más cambios. Sus compañeros del grupo de redacción habían aceptado

algunas de sus sugerencias, pero no todas, así que lo que ahora deseaba era que la junta las añadiera como enmiendas. En la audiencia final, celebrada en junio, Hardy preguntó a Moulton si estaba al día «de las últimas novedades sobre el tema del clima». Según ella, la información más reciente sobre la crisis climática era que esta no se estaba desarrollando como los científicos habían predicho. Moulton sugirió que el consenso mostrado por los científicos en lo que se refería al calentamiento global había sido exagerado, y que el objetivo real era la obtención de financiación para sus proyectos.

Hardy empezó a proponer enmiendas basadas en las sugerencias de Moulton, lo que provocó la protesta de Bell-Metereau. «¿No cree usted que alguien que trabaja con combustibles fósiles tendrá una opinión algo sesgada en este campo?», le preguntó a Hardy, a lo que esta respondió: «Es posible que yo sí tenga cierta inclinación por la industria de los combustibles fósiles».

Bell-Metereau y otros miembros de la junta amenazaron con retrasar todo el proceso si Hardy insistía en incorporar más cambios. Finalmente, Hardy retiró las propuestas. Pero, en cierto sentido, Moulton y el consejo ya se habían salido con la suya: las nuevas directrices para las asignaturas optativas hacían múltiples referencias al análisis coste-beneficio, y se eliminaron en la mayoría de casos los términos «energía renovable» y «energía no renovable». La única mención a los efectos de la quema de combustibles fósiles que aparecía en los textos anteriores desapareció de los nuevos y la descripción sobre el cambio climático se había dulcificado.

LOS DEFENSORES DE LA EDUCACIÓN CLIMÁTICA fracasaron en su intento de fortalecer la presencia de la ciencia que hace referencia a la crisis climática en las asignaturas de secundaria (troncales u optativas) mientras eran testigos de cómo los voluntarios del Consejo de Energía de Texas cosechaban un éxito tras otro. Pero seguían albergando esperanzas respecto al tramo K-8. Casi todos los alumnos de los últimos cursos de primaria tienen las mismas clases de ciencias, y en ellas se trata el tema de los sistemas climáticos, por lo que era un lugar obvio en el que discutir la crisis para una generación de estudiantes que tendrá que vivir con sus consecuencias.

En un caluroso día de finales de agosto de 2021, la junta organizó una audiencia pública sobre las directrices curriculares para las escuelas K-8, a la que se pudo asistir tanto presencialmente como de forma virtual. Los grupos que se encargaban de la redacción presentaron los borradores, añadiendo un único pasaje en el que se mencionaba el cambio climático. Según esos borradores, se esperaba que los estudiantes de ciencias de octavo (13 y 14 años) «se basen en las pruebas científicas disponibles para describir el modo en que las actividades humanas pueden influir en el clima, por ejemplo, mediante la liberación de gases de efecto invernadero». Uno de los grupos de redacción, en el que se encontraba el director ejecutivo de una fundación de gas natural, también adjuntó una nota en la que se indicaba que no se había podido llegar a un consenso sobre la propuesta de añadir otra línea: «Investigar y describir los costes y beneficios de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero frente a la pobreza energética mundial».

El «inactivismo» no niega el cambio climático antropogénico, pero lo minimiza, desvía la culpa e intenta retrasar las acciones para paliarlo

En la audiencia, dos de los asesores de contenido que habían revisado los borradores dieron a la junta opiniones radicalmente diferentes. Ron Wetherington, profesor de antropología retirado que trabajó en la Universidad Metodista del Sur y que fue nominado por Pérez-Díaz, señaló que era necesario hacer un mayor hincapié en el tema climático. Entre otras cosas, propuso que se retirase la palabra «pueden» de la frase «describir el modo en que las actividades humanas pueden influir en el clima». «Pueden» implica que lo que se indica es una posibilidad y, en la actualidad, existen numerosas pruebas que demuestran que esa influencia es real. También le pidió a la junta que los estudiantes conocie-



sen los esfuerzos que se realizan para mitigar la crisis. De esa forma, sabrían qué es lo que se está haciendo para solucionar el problema.

Gloria Chatelain, docente con una larga experiencia y CEO de su propia firma consultora, Simple Science Solutions, quien fue propuesta para formar parte de la junta por Hardy y Cargill, se posicionó en contra. Empezó su intervención elogiando «el trabajo absolutamente asombroso» realizado por el Consejo de Energía de Texas en la mejora de las directrices existentes. También dijo que, en la enseñanza media, el cambio climático antropogénico debería ser tratado de forma muy superficial. «Nuestro objetivo no es crear niños enfadados, sino niños que amen la ciencia. Les estamos estimulando para que resuelvan algunos de estos excitantes problemas, pero no para que se conviertan en Gretas», añadió, en referencia a Greta Thunberg, la adolescente activista climática de Suecia. En cambio, la junta debería pedir que los estudiantes «investiguen y describan el papel de la energía en la mejora de la calidad de vida a la hora de reducir la malnutrición y la pobreza en el mundo», una idea sugerida por el propio consejo. «Creo que hay que ponerlo, chicos. Es muy, muy importante que incluyamos este tema», dijo Chatelain.

Durante tres días de esa semana, la junta se centró en el lenguaje que debía utilizarse en las escuelas K-8. Ante las protestas de los demócratas, Hardy aceptó añadir la «relación coste-rendimiento» en cada programa de la enseñanza media. Ella y Hickman convencieron a la mayoría conservadora de la junta para que aceptase cambiar las múltiples referencias que se hacían en los programas de primaria a las energías renovables y no renovables, y sustituirlas por el término «recursos naturales».

El segundo día, los defensores de la educación climática obtuvieron dos victorias inesperadas.

Pérez-Díaz propuso reformular el tema climático para que «describiera cómo, durante los últimos 150 años, las actividades humanas, entre ellas la liberación de gases de efecto invernadero, han influido e influyen en el clima». Propuso añadir una línea: «Describir los esfuerzos realizados para mitigar el cambio climático, entre ellos, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero». Ambas enmiendas fueron aprobadas. Pero, al tercer día, la junta eliminó la referencia a los últimos 150 años y volvió a añadir la palabra «pueden». Los detalles del reciente cambio climático, argumentó Hardy, serían demasiado difíciles de entender para los alumnos de 13 y 14 años.

«Llamemos a las cosas por su nombre», señaló Aicha Davis. «En este momento, lo que votamos es lo que le interesa a la industria petrolífera y gasística»

Aicha Davis, de Dallas y miembro de la junta que se pasó once años enseñando ciencia antes de cursar un doctorado en política educativa, pidió la palabra. «Con todos los respetos para mi colega, está claro que nunca ha dado clases a niños y niñas de esa edad», dijo con cierta indulgencia. Y prosiguió: «No podemos dejar que la industria del petróleo y el gas dicte lo que nuestros hijos tienen que aprender cuando se trata de ciencia. No se trata de qué es lo mejor para el Consejo de Energía de Texas, sino de qué es lo mejor para nuestros estudiantes». Añadió que ni a los científicos ni a los educadores les preocupaba tener que explicar lo que era el cambio climático a los alumnos de octavo. «Así que llamemos a las cosas por su nombre. En este momento, lo que votamos es lo que le interesa a la industria petrolífera y gasística.»

Hickman, el abogado de Shell, encendió su micrófono. «Quiero recordar algunos aspectos», dijo. «Uno es que nuestro fondo escolar permanente procede generalmente del petróleo y el gas», refiriéndose a que estas industrias eran una importante fuente de financiación de la educación, la cual era posible gracias, en parte, a los ingresos de los combustibles fósiles obtenidos en tierras públicas. «Seguramente, todos nosotros vamos a llegar a casa usando petróleo y gas... Si todo esto es cierto, que los gases de efecto invernadero son muy malos, ¿qué hemos de hacer? ¿Prohibimos la gasolina y dejamos de utilizar coches de gasolina? ¿Prohibimos el diésel para los camiones? ¿Cómo compramos en Amazon y Walmart?». El presidente de la junta sugirió que se pospusiera esa cuestión hasta la ronda final de audiencias, prevista para noviembre de 2021.

Mientras esperaban a que se celebrara la última ronda, tanto el Centro Nacional para la Educación Científica como la Red de Libertad de Texas se organizaron. Reclutaron a 67 científicos del clima de Texas para que firmaran una carta conjunta en la que, entre otras cosas, se pedía que la palabra «pueden» fuera retirada del pasaje sobre el clima y que se mantuviera lo referente a los esfuerzos de mitigación del cambio climático, no solo porque se trataba de «conocimientos básicos» que todo ciudadano debería saber, sino porque proporcionaría a los estudiantes una sensación de esperanza.

Sin embargo, la ronda final de deliberaciones celebrada en noviembre fue una carnicería. Se añadió la referencia al cambio climático únicamente de forma limitada, medida que fue apoyada por la mayoría conservadora. Pero rechazaron la moción con la que se pretendía borrar la palabra «pueden». También bloquearon otra moción que pretendía eliminar el análisis coste-beneficio en las asignaturas de ciencias de secundaria. Aprobaron frases nuevas sobre «el papel fundamental de los recursos energéticos» en la vida moderna y se incluyó una referencia a las tierras raras y el concepto de pobreza energética global.

Por último, Hickman propuso suprimir lo referente a la mitigación del cambio climático que Pérez-Díaz había conseguido añadir en septiembre, argumentando que el tema era más

apropiado para los estudios sociales que para la ciencia, y que «es demasiado complejo para una asignatura de secundaria». Los demócratas de la junta se opusieron al cambio, pero eran minoría. La junta lo sustituyó por «el ciclo del carbono».

El Consejo de Energía de Texas y otras dos organizaciones aliadas emitieron un comunicado de prensa conjunto en el que elogiaban a la Junta Estatal de Educación por adoptar normas que «enfatizan el papel fundamental de la energía en la vida moderna». En cambio, la Red de Libertad de Texas albergaba sentimientos encontrados; así lo mostró en su informe anual: «La Junta Estatal de Educación podría y debería haberlo hecho mucho mejor. Pero, gracias a nuestra insistencia, se incluyeron nuevas directrices científicas que, por primera vez, dejan claro a los estudiantes que asisten a las escuelas públicas de Texas que el cambio climático es algo real y que su causa es la actividad humana».

La industria de los combustibles fósiles ha trabajado durante décadas para hacer llegar sus mensajes a los estudiantes. He encontrado ejemplos por todo Estados Unidos. Las empresas petrolíferas financian con regularidad la formación de los profesores a los que incentivan con material escolar gratuito. La industria ha gastado millones de dólares creando y distribuyendo su punto de vista sobre la energía. He sido testigo de cómo un empleado de una industria petrolífera y gasística dio una charla a una clase de niños y niñas de 13 años en la que restaba importancia a la crisis climática.

A pesar de la gran cantidad de material educativo en línea que tienen a su disposición, solo el 9 por ciento de los profesores de ciencias de secundaria dicen que nunca utilizan libros de texto. Los libros de texto de ciencia de educación media más populares del país plantean serias dudas sobre el cambio climático o lo mencionan solo de pasada. En uno de ellos, escrito en 2018 y presente en una cuarta parte de todas las escuelas de enseñanza media, los alumnos podían leer que «algunos científicos proponen que el cambio climático se debe a ciclos naturales del clima». Y la realidad es que el número de científicos del clima que apoyan esta idea es cero.

Otros estados también compran una gran cantidad de libros de texto. En California, por ejemplo, las directrices curriculares incluyen la ciencia del cambio climático, lo cual provoca una división. Las editoriales de libros de texto crean un conjunto de productos para Texas y otros estados con un perfil similar y otro conjunto para estados alineados con California. Ello provoca un problema de igualdad: la educación que recibe un niño sobre un tema tan fundamental en la actualidad depende del estado en el que vive.

En abril de 2022, la Agencia de Educación de Texas pidió que los nuevos libros de texto se basaran en las nuevas directrices. Los editores tenían un año para enviar los libros a la agencia. Una vez allí, serían revisados por si contenían algún error y valorarían lo fieles que eran a esas nuevas directrices. A continuación, el material educativo pasaría por la junta estatal para ser aprobado o rechazado. Los distritos escolares de Texas podían crear sus propios libros de texto, pero estos deberían cumplir con las directrices. La mayoría se decanta por las elecciones de la junta. Los nuevos libros de texto de ciencias estarán disponibles en las escuelas en otoño de 2024.

La educación que recibe un niño sobre un tema tan fundamental depende del estado en el que vive

Moulton, del Consejo de Energía de Texas, me comentó que el proceso de adopción de las directrices le parecía revitalizante y que esperaba seguir participando en él. Tan pronto como pueda, me dijo, empezará a revisar los nuevos libros de texto y le dará a la junta su opinión sobre ellos.

Katie Worth escribe sobre ciencia y política. Es autora del libro *Miseducation: How climate change is taught in America* (Columbia Global Reports, 2021)



EN NUESTRO ARCHIVO

La educación científica del siglo XXI: Retos y propuestas. Neus Sanmartí Puig e Iván Marchán Carvajal en *IyC*, octubre de 2015.

FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

POR QUÉ LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL NO PUEDE QUERER NADA

¿Actuarán y tomarán decisiones las máquinas algún día? ¿Tendremos entonces que reconocerles intencionalidad como a los seres humanos? Una refutación

Dorothea Winter

Poco después de que no sucediese el apocalipsis supuestamente profetizado por los mayas en 2012, se popularizó otro escenario de horror: la dominación mundial de los «Terminator», es decir, de máquinas inteligentes, que, desde hace tiempo, dan lugar a noticias cada vez peores. Hasta qué punto está extendido el miedo a los superordenadores lo demuestra una encuesta realizada por la Sociedad para la Investigación Innovadora de Mercado (GIM, por sus siglas en alemán) encargada por el Grupo Bosch.

Según el estudio, publicado en 2020, el 82 por ciento de los ciudadanos alemanes temen una vigilancia generalizada por parte de la inteligencia artificial (IA). Un número similar (79 por ciento) cree que los sistemas técnicos tomarían decisiones poco éticas y tres de cada cuatro encuestados ven amenazada nuestra seguridad por el creciente poder de las máquinas que actúan de manera autónoma. El hecho de que el «Gran Hermano» observe nuestra sala de estar y nuestro dormitorio es para una mayoría una realidad que se siente hace tiempo. ¿Se acerca de manera inminente el dominio de los bits y los *bytes*?

Esta cuestión entraña una pregunta técnica: ¿es, en principio, la IA capaz de hacer algo así? En cierto modo, sí. Los algoritmos inteligentes ya se están utilizando, por ejemplo, como instrumentos de espionaje y manipulación, por parte de personas y organizaciones que persiguen diferentes objetivos. Sin embargo, ello no significa que la propia IA aspire a algo parecido a la dominación.

Los filósofos de la tecnología discuten esta cuestión bajo el término de «intencionalidad», es decir, la cualidad de llevar a cabo acciones deliberadas y orientadas a un objeto. Muchos autores consideran la intencionalidad como un componente permanente de la conciencia.

La intencionalidad se atribuye principalmente a estados mentales, como las percepciones, las creencias o los deseos. La idea subyacente es que siempre nos podemos dirigir a objetos escogidos, individuales, pero nunca al mundo como totalidad. Cuando pensamos o sentimos, utilizamos una suerte de «reflectores» que iluminan secciones limitadas del mundo; no todo a la vez, como hace el Sol. Lo que accede a nuestra conciencia (percepciones, pensamientos, sentimientos u otros contenidos de la experiencia) posee en cada caso propiedades experienciales subjetivas, también llamadas qualia (por ejemplo, la sensación de dolor o la percepción del color rojo).

Aunque el concepto procede de la escolástica medieval, el debate moderno sobre la intencionalidad se remonta al filósofo y psicólogo Franz Brentano (1838-1917). En su libro *Psicología desde el punto de vista empírico* (1874) sostuvo que la intencionalidad es la característica esencial de


PHONLAMAIPHOTO/ISTOCK

todos los actos de conocimiento: siempre están referidos al objeto, es decir, dirigidos a algo.

Para Brentano, una característica básica de lo mental es dirigirse a un objeto o referirse a él. Por ejemplo, si pienso «la manzana está sobre la mesa», eso se refiere a los objetos *manzana* y *mesa*, así como a la relación espacial que guardan entre sí. Con respecto a este estado de cosas, el pensamiento puede ser verdadero o falso. Brentano consideraba por ello la intencionalidad algo exclusivamente psíquico: «Ningún fenómeno físico muestra nada semejante».

Pensamientos como eventos puramente físicos

Por el contrario, los materialistas reducen los estados mentales —y, por tanto, intencionales— a los estados físicos. Desde su punto de vista, pensar en una mesa o en una manzana depende de ciertas circunstancias físicas de mi cerebro. Es una cuestión abierta si a estas también se les puede atribuir intencionalidad.

Los materialistas equiparan los pensamientos con eventos neuronales. Otros, en cambio, sostienen que un proceso en el cerebro es intencional solo si se pueden explicar el sentido, los motivos y la verdad también sin estados mentales (por ejemplo, aludiendo a que simplemente se dan en el lenguaje de las neuronas o de las máquinas). Desde este punto de vista, la IA (sobre todo la que se basa en estructuras neuronales) tendría intencionalidad.

Pero, ¿cómo podría confirmarse tal característica de la inteligencia de las máquinas? ¿Qué podría servir como prueba? Ya en 1950, el matemático Alan Turing (1912-1954) desarrolló el test que hoy lleva su nombre: el test de Turing. En él, una persona se sienta ante un ordenador

y se comunica con dos interlocutores desconocidos para él. Uno es un ser humano; el otro, un ordenador. La persona hace preguntas que responden ambos, el humano y el ordenador. Si no puede diferenciar si las respuestas provienen de una persona o de un ordenador, este último ha superado el test. Según Turing, debemos entonces reconocer que la máquina tiene inteligencia en el mismo sentido que su compañero humano.

Google presentó una nueva interpretación del test de Turing en una conferencia de desarrolladores en 2018 con su sistema Duplex. Esta IA es capaz de realizar llamadas telefónicas con voz humana, por lo que el usuario apenas puede reconocer que no se trata de una persona. Sin embargo, esto tiene ciertos límites: en cuanto se quiere hablar con Duplex de otra cosa que no sean las reservas de citas que gestiona, la IA no funciona. Con todo, dentro del marco fijado, los humanos y las IA no son fácilmente distinguibles. Entonces, ¿ha superado Duplex el test de Turing?

Dudas sobre el test de Turing

Una crítica obvia a este procedimiento es que el test de Turing reposa sobre la premisa de que se pueden confirmar el pensamiento y la intencionalidad de un ordenador mediante la evaluación por parte de un humano. El filósofo John Searle ya lo puso en duda en su artículo «Mentes, cerebros y programas», de 1980.

Para ello planteó el experimento mental de la sala china. Supongamos que una persona se encuentra en una habitación llena de libros. Ahora se le pasa por debajo de la puerta una hoja de papel en la que hay escritos caracteres chinos. Los libros que se encuentran en la sala explican en la lengua materna de la persona qué caracteres de la hoja deben ser «respondidos» con qué otros símbolos. Sin conocer ni uno solo de los símbolos, es decir, sin entender nada en absoluto, la persona logra escribir en el papel respuestas con sentido. Alguien que domine el chino y que se encuentre fuera de la habitación tendría que asumir que la persona que está en el interior conoce el significado de los caracteres.

Con esta analogía, Searle señaló un hecho simple: los ordenadores siguen instrucciones sobre cómo deben ser manejados los signos y cómo reaccionar adecuadamente ante ellos según ciertas reglas. Así, un movimiento del ratón en una pantalla puede representar que se aplique la fórmula binomial o que se reconozcan las expresiones de un chat como un discurso de odio y se bloqueen. ¿Pero «sabe» el ordenador lo que está haciendo? No. No entiende nada de nada.

Los humanos consideramos que la IA es intencional porque nosotros mismos lo somos

Los sistemas de las máquinas no conocen las conexiones mecánicas, ni las comunicativas u otras. El significado de sus reacciones se deriva solo de la intencionalidad humana. En otras palabras: si un vehículo autónomo frena *para* no atropellar a un peatón, ese «para» procede de los seres humanos. Los motivos y consideraciones legales, sociales o morales solo los conocemos nosotros.

Para Searle, la intencionalidad no se basa únicamente en la comprensión del significado. Más bien, se vincula con determinados «actos de habla». En la teoría de los actos de habla de Searle, los actos comunicativos deben ser interpretados como acciones. El lenguaje humano, más allá de la gramática y el significado, tiene siempre un propósito intencional, ausente en los sistemas de signos de la máquina.

Junto con Paul Grice y otros teóricos, Searle desarrolló la tesis de que la intencionalidad se manifiesta solo en la capacidad para el uso dirigido del lenguaje. Este surge cuando una persona persigue una intención que la hace hablar. Por ejemplo, una madre y Alexa de Amazon pueden responder con las mismas palabras cuando un niño grita «¡Ay!»: «Oh, lo siento, ¿puedo ayudarte?» El contenido significado, sin embargo, difícilmente podría ser más diferente: la empatía y el cuidado, por un lado; una simple fórmula de cortesía programada, por otro.

Algunos apologistas de la IA argumentan que esto vale solo para la «IA débil», ya que solo puede ofrecer aquellos resultados que le han sido previamente suministrados. Tal es el caso de la IA existente hasta la fecha: ya sea para seleccionar un candidato, para diagnosticar un cáncer o para la conducción autónoma (todas las

decisiones de las que tales sistemas son capaces se basan en rutinas computacionales que los humanos han diseñado).

Otra cosa es la «IA fuerte». Aquí, los humanos dan solo el impulso inicial. Toda la estructuración posterior y los patrones de reacción son generados por la propia IA. En consecuencia, dicen, también podría desarrollar una intencionalidad propia —sin embargo, esta posibilidad es hasta ahora solo una hipótesis. Todas las distopías según las que tales sistemas podrían someter o exterminar a la humanidad son pura ciencia ficción—.

Con todo, las predicciones más cautelosas sobre el modo en que la IA cambiará nuestro mundo son más que dignas de consideración. Un estudio del Instituto para el Futuro de la Humanidad, en Oxford, publicado en 2018, predecía que en el curso de la década de 2020 muchos trabajos serían realizados por máquinas: de la traducción de textos a la conducción de camiones. La IA podría incluso conquistar las listas de superventas con canciones propias o escribir noticias y *bestsellers*. Vista así, parece penetrar en áreas humanas originales.

¿Solo una cuestión de progreso técnico?

En vista de las posibilidades técnicas en constante crecimiento, se dice que la IA conquistará en breve el último bastión de lo humano: la intencionalidad. Pero la atribución de esta es el resultado de una necesidad humana primaria. Como seres sociales, dependemos tanto de no perder de vista las propias intenciones como de atribuírselas también a nuestros respectivos compañeros.

Una sociedad sin intencionalidad que le sirva de base no sería solo disfuncional, sino también carente de sentido: solo ella me permite comprender como «yo» a la persona que está en el espejo. Como los psicólogos del desarrollo mostraron en la década de 1970, los bebés reconocen después de pocos meses de vida que un punto rojo en la imagen que se refleja en el espejo procede de un punto igual que está en su frente. Refieren el punto a sí mismos.

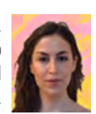
Dado que por ahora no hay ningún otro método comparable para demostrar la intencionalidad, es muy difícil «consultarla» en la IA. La inteligencia, en cambio, es más fácil de medir. Un equipo de investigadores chinos desarrolló en 2016 un método que podía hacer comparables los cocientes intelectuales de sistemas artificiales y naturales. La IA del asistente de Google obtuvo así una puntuación de apenas 50 (más o menos el nivel de un niño pequeño). Sin embargo, esta atribución es, en el mejor de los casos, un indicio débil, y de ninguna manera suficiente, para acreditar la intencionalidad de una IA.

Posiblemente esto no es más que otra muestra del modo en que nuestro propio pensamiento influye en nuestra visión de la realidad. Que atribuyamos intencionalidad a la IA es un acto de antropomorfización y, por tanto, de humanización. Los humanos consideramos que la IA es intencional porque nosotros mismos lo somos.

Las dudas relativas a que las máquinas puedan desarrollar alguna vez intencionalidad se alimentan también de otra fuente: la lógica. Dado que calcular y pensar son procesos fundamentalmente diferentes, es de suponer que solo a partir del primero no se llega nunca al segundo. Las operaciones de cálculo no llegan más allá de las premisas establecidas para ellas; la mente humana, en cambio, gracias a la intencionalidad, tiene la capacidad de reflejarse a sí misma.

La intencionalidad constituye una facultad humana original. Crea la posibilidad de reconocer el sentido, al que solo nosotros tenemos acceso como seres pensantes y sociales. Por tanto, el dominio mundial de la IA debería seguir siendo, también en el futuro, una pesadilla hollywoodiense.

Dorothea Winter es filósofa. Actualmente está realizando un doctorado sobre intencionalidad e inteligencia artificial en la Universidad Humboldt de Berlín.



PARA SABER MÁS

Intelligence quotient and intelligence grade of artificial intelligence. Feng Liu, Yong Shi y Ying Liu en *Annals of Data Science*, vol. 4, núm. 2, págs. 179-191, mayo de 2017.

When will AI exceed human performance? Evidence from AI experts. Katja Grace et al. en *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 62, julio de 2018.

Minds, brains, and programs. John R. Searle en *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 3, núm. 3, págs. 417-424, septiembre de 1980.

EN NUESTRO ARCHIVO

Tertulia donde se discurre sobre el test de Turing y la posibilidad de crear máquinas pensantes. D. R. Hofstadter en *IyC*, julio de 1981.

¿Es la mente un programa informático? John R. Searle en *IyC*, marzo de 1990.

¿Máquinas pensantes? María Cerezo en *IyC*, septiembre de 2014.

El traje nuevo de la inteligencia artificial. Ramon López de Mántaras en *IyC*, julio de 2020.

FORO CIENTÍFICO

LA PROTECCIÓN DE LA BIODIVERSIDAD NO ES UNA CAUSA PERDIDA

Seguimos a tiempo de atender al llamamiento de Rachel Carson, figura clave en el nacimiento del ecologismo

Naomi Oreskes

El clásico de Rachel Carson sobre las amenazas que infligimos en el ambiente, *Primavera silenciosa*, desató una ola de ecologismo en Estados Unidos y en el mundo. El libro tuvo una influencia directa en la decisión tomada en 1972 por la recién creada Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) de prohibir el uso del plaguicida DDT. Este mes de septiembre se cumplen 60 años de la publicación de la obra. El aniversario supone una ocasión propicia para pensar si logró una de sus metas principales: proteger la vida silvestre, en particular las aves.

Carson escogió un tema técnico complejo, los efectos nocivos de los plaguicidas persistentes, y lo expresó en una imagen sencilla y poética: una primavera en la que no se escucharía el canto de los pájaros. Nos pidió que imagináramos lo que sería despertarse una buena mañana en un mundo sin ellos. Escribió con sensibilidad y nos hizo sentir la pérdida. Pero ¿hemos hecho caso a sus advertencias?

Con algunas excepciones, no hemos tenido gran éxito. Tampoco las aves han salido bien paradas. En 2019, un estudio importante dirigido por Kenneth V. Rosenberg, ornitólogo de la Universidad Cornell, señaló que desde 1970 ha desaparecido el 25 por ciento de la avifauna de Norteamérica. El trabajo resulta destacable por su extensión: integró los datos de distintos censos de especies y los diversos biomas donde habitan y empleó varios enfoques para validar los recuentos; un artículo publicado por la Sociedad Audubon calificó ese declive generalizado de las aves de «situación grave». Las praderas y las estepas eran las más deterioradas, con la desaparición verificada de más de 700 millones de individuos reproductores, lo que corresponde a una disminución superior al 50 por ciento. Pero las pérdidas importantes han afectado a todos los biomas, salvo uno, y a casi todas las especies. La reducción neta ascendería casi a tres millones de aves, una cifra que desencadenó una campaña con consejos de lo que podemos hacer en su favor (los dos primeros eran poner pegatinas en los vidrios de las ventanas y mantener los gatos dentro de casa).

A la vista de las estadísticas, es tentador concluir que, pese a la brillantez de su relato, Carson no logró proteger las aves como pretendía. Es más, su declive forma parte de la enorme pérdida de biodiversidad que la actividad humana está provocando en todo el mundo. Según la Plataforma Intergubernamental sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas, más del 40 por ciento de los anfibios, casi el 33 por ciento de los corales y más de un tercio de los mamíferos marinos están amenazados. En total, los biólogos calculan que más de un millón de especies corren peligro. Ello también

YIFAN WU

amenaza al bienestar humano, pues el grupo subraya que estamos «socavando los cimientos mismos en que descansan la economía, los modos de vida, la seguridad alimentaria, la salud y la calidad de vida en todo el planeta».

Aun así, pese a sus conclusiones funestas, el estudio ornitológico de 2019 plantea también que la protección de la biodiversidad, y, por ende, la de nosotros mismos, no es una causa perdida. Una excepción importante en el sombrío panorama que los científicos han pintado son los humedales de EE.UU. y las aves acuáticas que moran en ellos: la abundancia de la avifauna ha crecido un 13 por ciento. ¿Qué los diferencia de otros ecosistemas? Una respuesta es que hace tiempo que las zonas húmedas gozan de especial protección frente a la actividad industrial excesiva en el país. Han contado con amparo legal a nivel federal, estatal y tribal. Algunas de esas leyes, como la poderosa ley de protección de los humedales de Massachusetts, los priorizan por su valor ecológico diverso. Otras los salvaguardan porque son importantes para la navegación y el comercio, las pesquerías, el control de las inundaciones y el abastecimiento de agua. La Ley de ríos y puertos de 1899, por ejemplo, protege los humedales porque forman parte de las vías navegables interiores.

La otra excepción alentadora en el estudio son las aves rapaces. Entre ellas destaca el pigargo americano, cuyo censo ha aumentado en 15 millones de individuos. Esta ave majestuosa, emblema de EE.UU., estuvo al borde de la extinción en la época en que Carson escribía, pero se recuperó en buena parte gracias a la prohibición del DDT. En palabras de Rosenberg y sus colaboradores, «las cifras indican que la adopción de medidas, como la gestión de la fauna, la restauración de hábitats y la acción política pueden ser eficaces para salvar especies en grave declive». La ciencia ha corroborado la amenaza que se cierne en este momento sobre la biodiversidad. Los datos también nos demuestran que, si actuamos con esta información, podemos cambiar el desenlace.

Naomi Oreskes es profesora de historia de la ciencia en la Universidad Harvard.











ILBUSCA/ISTOCK

EVOLUCIÓN

MISTERIOS DEL CORAZÓN Y DE LA CABEZA

Amy Maxmen | Nuevos estudios sobre las ascidias, animales blandos, amorfos y acéfalos, suscitan interrogantes en torno a la evolución de los vertebrados

Majestuosa, serena y sabia cabeza,
que tan noble parte alberga;
más abajo se encuentra, escondido,
el corazón cálido e impulsivo.

La señorial cabeza que encima se asienta
y el corazón que bajo ella palpita
muestran a las claras sus dispares funciones
y cuáles son sus verdaderas relaciones.

John Godfrey Saxe, 1898

EN SÍNTESIS

La cabeza y el corazón comparten un nexo común en el proceso de formación del embrión en los animales vertebrados.

El estudio de las ascidias, un tipo de animales invertebrados, ha revelado que son ellas, y no los anfioxos, los parientes más cercanos de los vertebrados.

Tanto el proceso de cefalización, la aparición de una cabeza diferenciada que concentra los órganos sensoriales, como la aparición del corazón dividido en cámaras arrancarían de un antepasado común de los tunicados y los vertebrados.

Ahora se debate si ese antepasado era un animal móvil, de vida libre, o bien sésil, como las ascidias actuales.

Desde hace siglos, los escritores han reflexionado sobre si el corazón es la sede de las pasiones, la moralidad y el coraje. La cabeza, en cambio, era el lugar donde se asentaba la fría y dura racionalidad. El poeta estadounidense John Godfrey Saxe escribió sobre tales diferencias, pero concluyó sus versos señalando que la cabeza y el corazón son interdependientes: «Ambos son mejores cuando trabajan unidos. ¿Qué sería el calor sin la luz?». En aquella época, Saxe no podía saber que comparten una profunda conexión biológica.

Durante los últimos quince años, los científicos han descubierto que el desarrollo de ambos está relacionado. Entre otros avances, en 2010 se descubrió que el mismo grupúsculo de células que se divide y diferencia hasta formar el corazón en el embrión de ratón también engendra la musculatura de la garganta y la parte inferior de la cabeza. Algunos componentes básicos de ambos están cortados por el mismo patrón.

Aún más sorprendente resulta el hecho de que la conexión embrionaria entre la cabeza y el corazón precede al origen evolutivo de los vertebrados, es posible que al de la cabeza misma. Tal vínculo se ha descubierto gracias al estudio de las ascidias, animales sésiles que permanecen fijos en el fondo del mar y poseen dos aberturas, una por donde succionan agua y otra por la que la expulsan.

Pertenecientes al grupo de los invertebrados tunicados, las ascidias son los parientes vivos más cercanos de los vertebrados, a pesar de sus múltiples diferencias. Y aunque carecen de una auténtica cabeza, el vínculo evolutivo entre la cabeza y el corazón es sólido en ellas. «La primera vez que lo escuché pensé: "pero ¿qué me estás diciendo?"», comenta esbozando una sonrisa Billie Swalla, bióloga especializada en desarrollo evolutivo de la Universidad de Washington en Seattle.

Los investigadores han descubierto un grupo de células en el embrión de la ascidia que se divide y se diferencia para formar tanto el corazón como la musculatura de una estructura similar a una parte de la garganta de los vertebrados. Esto hace pensar que el nexo entre la cabeza y el corazón surgió antes de que estos dos linajes divergieran del tronco común hace cientos de millones de años. En la actualidad, Swalla y otros colegas intentan averiguar hasta dónde hay que retroceder para encontrar el origen de ese vínculo y saber si surgió en un animal inmóvil, sin cabeza, parecido a las ascidias actuales, o en otro que miraba hacia adelante mientras nadaba, dotado de una cabeza que evolucionaba a la par que su corazón. «Esa es una cuestión que no me deja dormir, esa y la COVID-19», señala Swalla.

En busca de vínculos

La mayoría de las formas de vida animales tienen corazón, en el sentido más simple de la palabra, es decir, un vaso sanguíneo contráctil que bombea líquido por todo el cuerpo. En los vertebrados, en cambio, el corazón es un órgano estratificado con orificios de entrada y salida qVue mantienen un ritmo circulatorio. Hasta hace más o menos una década, no se tenía muy claro el origen evolutivo del corazón con cámaras, pues no parecía que los parientes más cercanos de los vertebrados, los delgados y móviles anfioxos, tuviesen algo parecido a un corazón sencillo. Estos animales



LAS ASCIDIAS, como la especie estudiada *Ciona intestinalis* (*en la imagen*), son parientes cercanas de los vertebrados.

translúcidos de cuerpo sagitiforme, poseen un aparato circulatorio rudimentario (un simple tubo palpitante), por lo que los puristas no consideran que tengan corazón. Al parecer, con el tiempo ese vínculo se perdió.

El interés por los anfioxos se reavivó cuando en 2006 un estudio sugirió que no eran, de hecho, los parientes vivos más cercanos de los vertebrados. A partir de análisis genéticos de docenas de cordados, el filo al que pertenecen los vertebrados, los anfioxos y los tunicados, se comprobó que los parientes más cercanos son los tunicados (*véase en la página siguiente* «Un nuevo árbol evolutivo»). Este retrazado sorprendió a muchos especialistas, pues, a diferencia de los anfioxos, cuya forma recuerda vagamente a la de un pez, los tunicados recuerdan más a una masa informe, como un chicle, al menos a primera vista. La conclusión de los autores fue que «ya no se puede decir que los tunicados sean seres "primitivos"».

Los biólogos marinos que habían examinado la anatomía de los tunicados respiraron aliviados al conocer el descubrimiento. Linda Holland, bióloga especializada en desarrollo evolutivo que trabaja en el Instituto Scripps de Oceanografía, en la Universidad de California en San Diego, comenta que, si se tenían que ceñir al anterior árbol genealógico, los escenarios hipotéticos sobre la evolución del cuerpo de los cordados «simplemente carecían de sentido». Sin ir más lejos, el corazón de un anfioxo no se parece en nada al de un vertebrado, mientras que el de una ascidia comparte ciertas similitudes y es bastante sofisticado.

Bajo el anodino aspecto externo del tunicado se esconde un corazón en forma de V rodeado por una espiral de fibras musculares que contraen el órgano con un movimiento gradual, de torsión, gracias al cual el líquido sigue circulando en una única dirección. El corazón también puede invertir la dirección del flujo.

Células cardíacas en movimiento

Con objeto de estudiar la evolución del corazón en los tunicados, a inicios de la década del 2000,

Bradley Davidson, investigador posdoctoral de la Universidad de California en Berkeley, se centró en el urocordado *Ciona intestinalis*. Seguía la tradición de los biólogos del desarrollo que, durante más de un siglo, habían seguido minuciosamente la trayectoria de las células que se dividen y migran en los embriones. Davidson manipuló genéticamente embriones de ascidia para que las células que expresaban cierto gen relacionado con la cardiogénesis en los vertebrados, conocido como *Mesp*, brillara con un color verde bajo la luz fluorescente. Cuando observó los embriones bajo un potente microscopio, un grupo de unas 16 células que formarían el corazón en etapas posteriores del desarrollo relució tal y como esperaba.

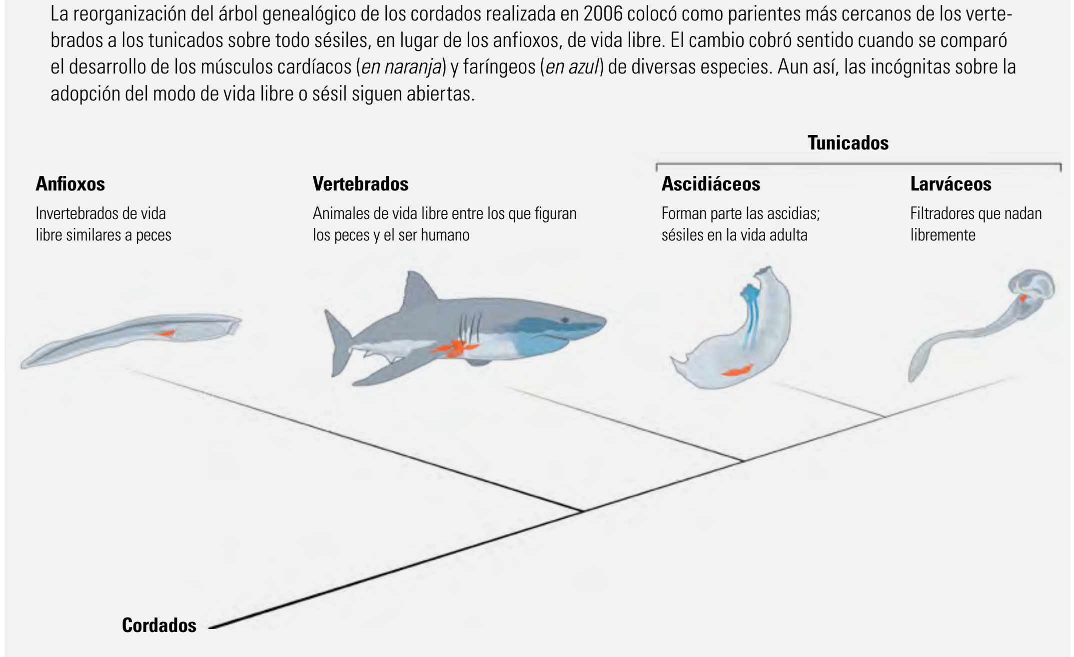
En 2005, otro investigador posdoctoral, Lionel Christiaen, se unió al laboratorio de Berkeley y decidió repetir el experimento de Davidson con el gen *Mesp*. Una mañana fotografió los embriones con el conjunto brillante de células y luego se marchó del campus. Sin ninguna razón en especial, decidió volver por la tarde a echar un nuevo vistazo. «Era uno de esos días en que uno está ansioso por hacer ciencia», recuerda Christiaen, en la actualidad biólogo evolutivo del Centro Internacional Sars de Biología Molecular Marina en la Universidad de Bergen, en Noruega.

Para su sorpresa, algunas de las células verdes brillantes habían migrado al lado opuesto del embrión, donde habían formado un anillo cerca de la faringe incipiente del animal. En la ascidia adulta, la faringe se llena de agua, filtra el plancton hacia el conducto digestivo y deja ir el líquido filtrado para que sea expulsado. En los vertebrados, la faringe forma parte de la garganta. Los peces canalizan con ella los tragos que toman al abrir la boca. Christiaen conocía los trabajos que señalaban que los músculos cardíacos del ratón procedían del mismo conjunto de células embrionarias que formaba algunos músculos de la parte inferior de la cabeza. Se preguntó si estaba observando algo parecido en aquellos embriones de tunicados.

En 1983, cuando los biólogos que estudiaban los orígenes de los vertebrados avalaron la teoría de la «cabeza nueva» para describir la evolución de la cabeza conformada, acompañada de un corazón palpitante justo debajo, se desconocía la existencia de precursores comunes del corazón y la cabeza. Estos autores supusieron que la selección natural había favorecido la evolución de toda una serie de características que mejoraron la capacidad de depredación y alimentación de los vertebrados. Una de esas adaptaciones fue la aparición de las mandíbulas a partir de las

Un nuevo árbol evolutivo

La reorganización del árbol genealógico de los cordados realizada en 2006 colocó como parientes más cercanos de los vertebrados a los tunicados sobre todo sésiles, en lugar de los anfioxos, de vida libre. El cambio cobró sentido cuando se comparó el desarrollo de los músculos cardíacos (*en naranja*) y faríngeos (*en azul*) de diversas especies. Aun así, las incógnitas sobre la adopción del modo de vida libre o sésil siguen abiertas.



FUENTE: «CARDIOPHARYNGEAL DECONSTRUCTION AND ANCESTRAL TUNICATE SESSILITY», A. FERRÁNDEZ-ROLDÁN ET AL. EN *NATURE*, VOL. 599, PÁGS. 431–435, 2021.

células de la cresta neural que daban lugar al esqueleto vertebrado. Otras adaptaciones básicas guardaban relación con la formación de órganos sensoriales perfeccionados en la nueva cabeza del depredador y de un cerebro complejo que integrara las señales (cefalización).

Los autores de la teoría se centraron esencialmente en las células que formaban las mandíbulas y otros huesos. Obviaron la evolución de los músculos situados en la faringe y en la zona inferior de la cabeza, que serían los encargados de mover las mandíbulas. La evolución de esa musculatura siguió siendo una incógnita durante décadas, hasta que Christiaen dio con una pista en ese anillo de células de los embriones tunicados en el que *Mesp* estaba activo.

Junto con sus colaboradores, realizó un segundo experimento. Esta vez, hicieron que las células en que se expresan los genes vinculados con la formación de la mandíbula en los vertebrados inferiores (*Islet* y *Tbx1/10*) brillaran con color verde en los embriones de tunicados. Como era de esperar, las células procedían del mismo grupo que daba lugar al corazón. En un artículo publicado en 2010, el equipo acuñó el término «cardiofaríngeo» para describir las células embrionarias que forman el corazón y la faringe en los tunicados, planteando como harto probable que tales células estuvieran presentes en el antepasado común de los tunicados y los vertebrados. Además, afirmaron que esas células especiales habrían sido fundamentales en la coevolución de los aparatos circulatorio, respiratorio y digestivo de los vertebrados. «Las células cardiofaríngeas precedieron a la aparición de la mandíbula», señala Christiaen. «Estaban preparadas para dar forma a los huesos y los músculos de la cabeza».

Inmóviles con corazón

Otro biólogo evolutivo que estudia el origen de los vertebrados y sus afines, Cristian Cañestro, de la Universidad de Barcelona, señala que el estudio de Christiaen sugiere que «la maquinaria que construyó la “nueva cabeza” estaba presente en el último antepasado común» de los vertebrados y los tunicados. Pero, ¿tenían cabeza esos antepasados?

Es posible que así fuera y que los tunicados perdieran la suya. Dos hechos apoyan esa idea. Antes de quedar fijadas en una roca o en el suelo marino, las larvas de tunicado son móviles y nadan libremente, con una parte frontal y una cola reconocibles. Además, un pequeño grupo de tunicados, los larváceos, llamado así porque superficialmente parecen larvas nadadoras, conserva la movilidad toda la vida. De un par de centímetros de largo, pululan por el mar imprimiendo un movimiento a su cola que genera una corriente de agua que fluye a través de una «carcasa» de burbujas que ellos mismos crean en torno al cuerpo, lo que les permite filtrar el plancton.

Para algunos estudiosos, la existencia de los larváceos supone un punto a favor del antepasado tunicado móvil. Cañestro decidió que era el momento de saber más sobre ellos, por lo que puso en marcha una colonia de estos invertebrados en el sótano de su laboratorio de Barcelona. Instalados en un tanque de vidrio en el que circulaba agua marina, cientos de larváceos pululaban como motas de polvo durante su efímera vida.

Es muy posible que el antepasado común de los tunicados y los vertebrados tuviera cabeza, y que los tunicados la perdieran

«El quinto día, explotaron y liberaron cientos de espermatozoides y huevos que flotaban en la superficie», explica Cañestro.

Cuando su estudiante de grado, Alfonso Ferrández, estaba buscando un proyecto para la tesis doctoral, Cañestro le mostró el sótano con los larváceos y le sugirió estudiar el desarrollo del corazón. Ferrández empezó a buscar el *Mesp* y otros genes que se sabía que controlaban el desarrollo cardíaco en los tunicados y los vertebrados. Pero no los pudo encontrar. Modificó los protocolos y repitió los experimentos. Creó una serie de programas informáticos con los que cribar las secuencias genómicas. En vano. Al fin, llegaron a la conclusión de que la mayoría de los genes cardíacos estaban ausentes. No resulta sorprendente que falten genes en los larváceos, pues poseen uno de los genomas más pequeños

del reino animal; pero, curiosamente, sí tienen un corazón palpitante y muchas otras partes corporales que esos genes codifican en otros animales. «Entonces empecé a implicarme de verdad en el proyecto. Al principio no me entusiasmaba la historia del corazón, pero esto era interesante», confiesa Ferrández.

Con el tiempo, los larváceos lograron sobrevivir a la pérdida de genes, hallando otros modos de generar partes que les permitieran moverse, alimentarse y reproducirse

Gracias a ese entusiasmo, siguió adelante mientras la COVID-19 se propagaba por el planeta. Durante el estricto confinamiento impuesto en España, obtuvo permiso para ir al laboratorio y mantener con vida a los larváceos, mientras trabajaba en su proyecto. Faltaban el *Mesp* y otros genes conocidos, pero se las apañó para recuperar unos pocos genes que contribuyen a la formación del sencillo corazón de este animal, formado tan solo por ocho células musculares que se contraen rítmicamente para bombear líquido por el cuerpo. Con el paso del tiempo, los larváceos se las arreglaron para sobrevivir a la pérdida de genes, hallando otros modos de construir las partes que les permiten moverse, alimentarse y procrear, explica Cañestro. Según él, «la pérdida de genes puede ser adaptativa».

La conclusión del equipo de Barcelona, que apareció publicada en un artículo el pasado noviembre, era que, en lugar de ancestros, los larváceos podrían ser extraños vástagos de la familia de los tunicados. Plantearon entonces que el antepasado de los tunicados pudo ser una criatura sésil como las ascidias, no móvil como los modificados larváceos. «Me encanta el artículo», me comentó Davidson, que en la actualidad está en el Colegio Swarthmore de Pensilvania. En su opinión, este trabajo demuestra cómo surge la diversidad evolutiva a partir de los mismos bloques básicos.

Entre toda esa diversidad, empero, resulta muy difícil hallar rastros que permitan seguir la ascendencia de los animales. A pesar de las conclusiones del último estudio sobre los larváceos, Holland no está convencida del todo de que los tunicados fueran sésiles en sus orígenes. En apoyo de su argumento, confeccionó una lista de razones por las que las ascidias podrían ser atípicas y cita los atributos que comparten los larváceos con los anfioxos, que conservarían nexos con un escalón precedente de su evolución.

En los próximos años, ella y otros investigadores seguirán descubriendo pormenores del desarrollo de los vertebrados y de sus parientes más cercanos, célula a célula, gen a gen, y averiguarán qué modificaciones genómicas sucedidas a lo largo de cientos de millones de años hicieron posible todo ello. Lo único que de momento parece cierto es que tales cambios tuvieron lugar al ritmo de un corazón palpitante.

«Es muy posible que el corazón de los vertebrados evolucionase a partir de algo parecido al corazón de un tunicado, pero recordemos que estos animales están evolucionando a gran velocidad», reflexiona en voz alta. «Nunca sabremos con certeza cómo era su ancestro común, salvo que tenía corazón.»

Amy Maxmen es periodista sénior de *Nature*.



AMY MAXMEN WIKIMEDIA COMMONS (CC BY 3.0)

Con la colaboración de nature

Artículo original publicado en *Nature*, traducido y adaptado por Investigación y Ciencia con el permiso de Nature Research Group © 2022.

EN NUESTRO ARCHIVO

Secretos de las mixinas. Frederic H. Martini en *IyC*, diciembre de 1998.



TIM FLACH (*diamantes cebra australianos*)

COMPORTAMIENTO ANIMAL

ASÍ ESCUCHAN LAS AVES SU CANTO

Adam Fishbein | Según diversos estudios, las aves prestarían más atención a los sutiles matices acústicos, imperceptibles para el oído humano, que a las melodías que nos cautivan

El canto de los pájaros, algo que muchos han apreciado más que nunca durante la pandemia, nos evoca paralelismos con la música y el lenguaje. Discernimos melodías en el variado repertorio del chingolo cantor (*Melospiza melodia*), estructuras que semejan oraciones en la voz del sargento alirrojo (*Agelaius phoeniceus*) y alegres silbidos en los trinos del chingolo gorjiblanco (*Zonotrichia albicollis*).

El canto, que ha intrigado a los naturalistas desde la época de Aristóteles, suele definirse como las largas y, en ocasiones, complejas vocalizaciones que profieren las aves para atraer a una pareja o delimitar su territorio. Los estudiosos actuales lo diferencian de los reclamos, de ordinario más breves, sencillos e innatos y con muy diversos cometidos, como el de advertir de la proximidad de un depredador o de una fuente de alimento. Esta distinción dista de ser absoluta, pues el canto de algunas especies es más sencillo que sus reclamos. Aun así, cuando aquí hable de canto me estaré refiriendo a las tonadas más largas y complejas, no a las piadas breves.

La terminología al uso referente al canto de las aves, tanto la del profesional como la del aficionado, demuestra que lo percibimos como si fuera música o lenguaje. Si ahondamos en la jerga, cuando los ornitólogos analizan el canto lo descomponen en unidades más pequeñas, llamadas notas o sílabas. Luego agrupan las sílabas en secuencias (frases o temas) que tienen ritmos y tempos característicos. Así se pueden medir aspectos que posiblemente sean importantes, como la cantidad de tipos silábicos que conforman el repertorio de una especie o los patrones que siguen las frases. Estas descripciones son similares a las que definen las relaciones existentes entre las palabras en la sintaxis humana o entre las notas que forman las composiciones musicales.

Pero ¿qué piensan las aves de todas esas características? ¿Cómo interpretan los cantos? Una reciente investigación acometida con mis compañeros, que viene a sumarse a la labor de un creciente número de colegas de todo el mundo, ha revelado que no perciben su canto como nosotros. Es más, al parecer no prestan demasiada atención a las melodías que tanto nos gustan, sino a los sutiles matices vocales que quedan fuera del alcance de la percepción humana.

EN SÍNTESIS

Las aves no perciben su canto como nosotros, pues prestan más atención a los sutiles matices vocales que a las melodías que nos deleitan.

El sesgo sensorial inherente del oído humano había ocultado ese hecho, que los avances técnicos y los experimentos han desvelado últimamente gracias al análisis de la estructura fina del canto.

La capacidad de generación y modulación del sonido de la que hacen gala en especial las aves canoras reside en la siringe, un órgano fonador especializado sin equivalente en los demás vertebrados.

Más allá de la melodía

Quienes investigan el canto de las aves saben desde hace al menos sesenta años que estas lo perciben de un modo distinto al que podríamos suponer. Una de las formas más habituales de poner a prueba esa percepción en el medio natural consiste en reproducir los cantos con aparatos de sonido y analizar su reacción a ellos. Muchas aves responden a la grabación del canto de su especie como si se tratara de un intruso: se acercan al altavoz, revolotean alrededor en busca del extraño y emiten sus reclamos o sus cantos de advertencia territoriales. Mediante la comparación de las reacciones ante los cantos naturales y los manipulados, es posible averiguar qué características son importantes para ellas. En la era analógica, el soporte de grabación era la cinta magnética, que literalmente se cortaba y se empalmaba a trozos para crear cantos manipulados con, por ejemplo, sílabas reordenadas o silencios acortados entre las notas. Las grabadoras digitales y los programas de edición actuales han agilizado sobremanera esa labor.

En un estudio de reproducción hoy clásico que se remonta a la década de 1970, Stephen T. Emlen, de la Universidad Cornell, estudió la percepción del canto en el azulillo índigo (*Passerina cyanea*). El macho, de vivo plumaje azul, emite un canto compuesto de sílabas que casi siempre emite por pares al unísono. Las guías de campo suelen recalcar ese patrón emparejado cuando describen su canto, por lo demás fácilmente reconocible en un espectrograma, una representación visual que muestra la frecuencia y la amplitud de las ondas sonoras a lo largo del

Sílabas emparejadas

Onda sonora (*arriba*) y espectrograma (*abajo*) del canto del azulillo índigo. En el espectrograma, se representan el tiempo en el eje de abscisas (horizontal), la frecuencia o «tono» del sonido en el eje de ordenadas (vertical), y la amplitud o «volumen» de la señal en la intensidad del color rojo de los trazos (a mayor intensidad, mayor amplitud). Los tramos corresponden a las sílabas emparejadas del canto. Para el oído humano, las sílabas emparejadas son distintivas del azulillo, pero los individuos de esta especie responden de forma parecida a las versiones alteradas del canto en que las sílabas se han desemparejado, lo que sugiere que, a diferencia de nosotros, prestan atención a otras características del canto.

Canto del azulillo índigo

Tiempo (segundos) 0,5 1,0 1,5

Onda sonora

Espectrograma

Amplitud

Pequeña (silencio) ⟷ Grande (sonido fuerte)

Frecuencia (tono)

Alta

Baja

Sílabas emparejadas

Sílabas emparejadas

Sílabas emparejadas

Azulillo índigo

ADAM FISHBEIN (*onda y espectrograma*); LIZ WAHID (*ilustración del azulillo índigo*)

tiempo. (El equivalente sensorial de la frecuencia es el tono y el de la amplitud es el volumen.) A pesar de la notoriedad que ese patrón tiene para el observador humano, cuando Emlen reprodujo una versión modificada con sílabas desaparejadas, los azulillos reaccionaron con un celo territorial tan enérgico como el desatado ante el canto natural emparejado. Se deduce, pues, que el patrón de notas emparejadas no le resulta fundamental a la hora de reconocer a sus congéneres, por mucho que lo sea para nosotros. Si el azulillo describiera su canto en una guía de campo, la descripción sería muy distinta de la nuestra.

Estudiar cómo perciben las aves su canto en la naturaleza es sin duda importante, pero ese tipo de experimentos tiene sus límites. Sin ir más lejos, el ave de interés puede estar fuera del alcance de nuestro oído, ocupada en buscar comida, por ejemplo, y frustrar la prueba. En un laboratorio, la percepción del sonido se verifica y se controla con una precisión mucho más rigurosa. Cuando acudimos a una revisión de la audición, el otorrino nos pide que alcemos la mano o pulsemos un botón cada vez que oímos un sonido; cuando se examina la percepción auditiva de un ave, se adopta un enfoque parecido. Pero como no es posible preguntarle si oye el sonido que acabamos de emitir, la entrenamos para que picotee un botón situado a un lado de la jaula si lo percibe, o si encaja en cierta categoría sonora o difiere de otro.

Los estudios de laboratorio han desvelado numerosas similitudes entre la sensibilidad auditiva de las aves canoras y la humana. Una de ellas es que los intervalos en la percepción de las diferencias de tono o en la detección de vacíos entre los sonidos son parecidos. No obstante, también sobresalen diferencias sorprendentes entre su capacidad y la nuestra para escuchar secuencias sonoras y percibir matices.

Una fundamental es que a un pájaro le cuesta mucho reconocer una melodía que solo ha variado en un tono, tanto si es creciente como decreciente, algo que nosotros hacemos con toda naturalidad: reconocemos la melodía de «Cumpleaños feliz» tanto si se toca en un piano con tonos agudos como si se interpreta con una tuba de sonido grave. Los clásicos experimentos de laboratorio realizados durante las décadas de 1980 y 1990 por Stewart H. Hulse y sus colaboradores en la Universidad Johns Hopkins demostraron que, para un pájaro, cuando el tono de una secuencia cambia, la melodía suena diferente, aunque el patrón subyacente siga siendo el mismo. Por consiguiente, las melodías que percibimos cuando escuchamos su canto pueden ser muy distintas de las que él percibe.

Esta hipótesis se ha visto reforzada por estudios ulteriores. En 2016, un equipo dirigido por Micah Bregman, por entonces en la Universidad de California en San Diego, describió que el estornino pinto es capaz de reconocer secuencias traspuestas, pero solo si se eliminan todos los matices de los sonidos. Ese trabajo resalta la importancia que reviste para las aves la escucha de esos detalles.

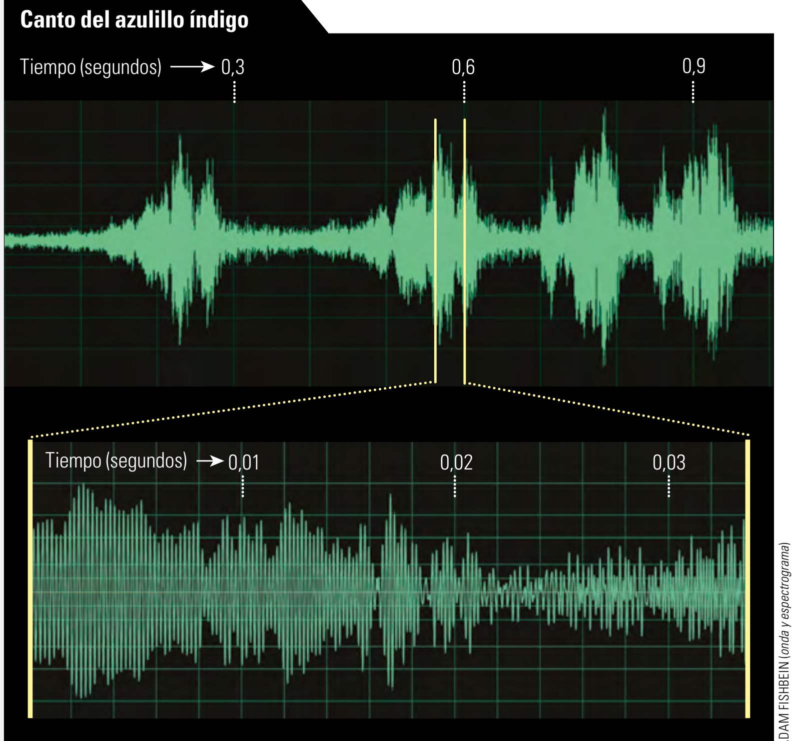
Un oído muy fino

Una onda sonora se puede descomponer en dos: la envolvente y la estructura fina. La primera está constituida por las fluctuaciones lentas de la amplitud de la onda, mientras que la estructura fina guarda relación con las fluctuaciones rápidas de la frecuencia y la amplitud de la onda. En otras palabras, la estructura fina de un sonido refleja su variación en la escala de los milisegundos. Muchos ornitólogos especializados la han ignorado en el pasado, en parte porque no resulta fácilmente visible ni en los sonogramas ni en los espectrogramas, recursos que han demostrado ser de suma utilidad a la hora de visualizar los cantos. Pero si analizamos a mayor resolución la onda de una sílaba del canto, podremos ver esos detalles acústicos tan finos.

Robert Dooling, de la Universidad de Maryland, es uno de los pioneros en el estudio de la estructura fina del canto, con décadas de investigación a sus espaldas. En un trascendente estudio publicado en 2002, su equipo comparó el modo en que las aves y los seres humanos distinguen sonidos que solo difieren en la estructura fina. Las tres especies estudiadas (diamante cebra, canario doméstico y periquito) superaron netamente a las

Estructura fina

Un análisis más a fondo del canto del azulillo revela detalles más finos que seguramente sean más importantes para él que las sílabas emparejadas. Aquí vemos la representación de la onda sonora del inicio del canto (*arriba*). Si aumentamos la parte marcada de la segunda sílaba del canto, veremos las rápidas fluctuaciones de la frecuencia y de la amplitud que se suceden en cuestión de milisegundos dentro de una sílaba (*abajo*).




TIM FLACH

ESTORNINO PINTO

personas y demostraron ser capaces de percibir diferencias en la estructura fina entre dos y tres veces más pequeñas que las detectadas por los participantes humanos. El mecanismo fisiológico que explica esa sensibilidad sobrehumana sigue siendo desconocido, pero tal vez tenga que ver con la anatomía del oído interno, muy diferente de la nuestra, pues las aves poseen una cóclea relativamente corta y poco curvada en comparación con la nuestra, con forma de espiral.

Cuando, en 2015, empecé a estudiar las semejanzas entre el canto de las aves y el lenguaje humano durante mi posgrado en la Universidad de Maryland, no pensaba mucho en la estructura fina. En lugar de eso, intentaba descubrir habilidades gramaticales similares a las del lenguaje, pero a medida que profundizaba en la cuestión y se sucedían los experimentos con ellas, me di cuenta de que la clave para entender lo que estaban comunicando con su canto podía residir en esos matices acústicos, más que en las secuencias en que eran emitidos.

La especie campeona de todas las protagonistas del estudio de Dooling en 2002 fue el diamante cebra. Esta pequeña y vivaz ave canora australiana es la más habitual en la investigación moderna del canto aviar en los laboratorios, sobre todo porque canta y se reproduce sin problemas en cautividad. Exclusivo del macho, el canto es relativamente sencillo: un único tema compuesto por entre tres y ocho sílabas que repite una y otra vez, por lo general en el mismo orden, cosa que facilita su estudio con respecto a otros. Cada joven aprende las sílabas y la secuencia de emisión de un adulto, en general su padre, por lo que cabría pensar que los dos niveles del canto son importantes en la percepción.

En 2018, pusimos a prueba esa idea en un estudio donde analizamos cómo perciben los diamantes la diferencia entre el canto natural y aquellos cantos en que se han invertido las sílabas temporalmente o se ha reordenado la secuencia. Los entrenamos para que nos comunicaran si percibían la diferencia entre los sonidos. Escuchaban un sonido repetido y luego pulsaban un botón para iniciar una prueba en la que el sonido podía cambiar o seguir siendo el mismo. Si picoteaban cierto botón cuando el sonido era diferente, contaba como un acierto y recibían una recompensa en forma de alimento. Si lo picoteaban cuando el sonido era el mismo, las luces de la cámara se apagaban y contaba como un intento al azar. Por medio de este método evaluamos la habilidad para discriminar

entre el sonido repetido (el canto natural) y los sonidos nuevos (temas en que las sílabas habían sido invertidas o reordenadas temporalmente). Desde su perspectiva, solo intentaban conseguir un bocado sabroso.

Resulta curioso que los diamantes cebra demostraran ser casi infalibles en la discriminación de las sílabas invertidas, una tarea que puede resultar difícil para nuestro oído, pero, en cambio, no lo fueran en absoluto discriminando las sílabas reordenadas, algo que es mucho más relevante para nosotros. Cuando se invierte una sílaba, una de las principales cosas que cambian es la estructura fina, por lo que no resulta sorprendente que lo hicieran tan bien en ese ejercicio. Sin embargo, su dificultad con las diferencias de secuencia nos causó sorpresa, no solo porque nosotros percibimos esos cambios con facilidad, sino porque los machos aprenden a emitir las sílabas en un orden concreto. El reconocimiento defectuoso de las sílabas reordenadas puede significar que, para ellos, la secuencia es importante en el proceso de aprendizaje, pero no contiene mucha información para la comunicación.

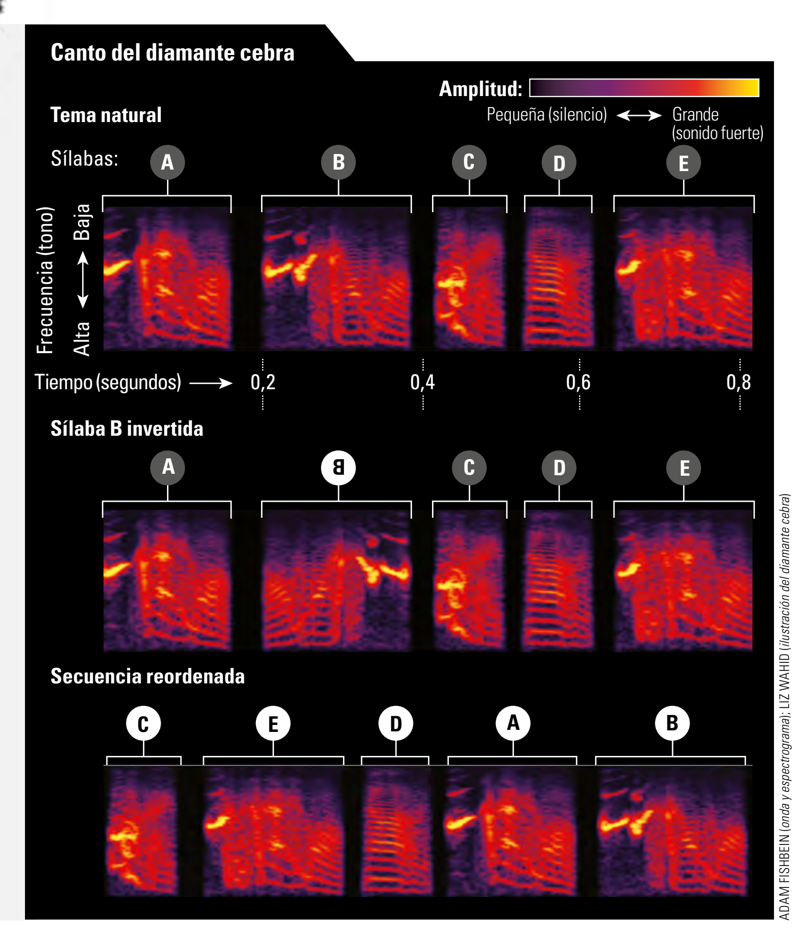
Ante los resultados de esos experimentos con cantos modificados artificialmente, junto con mis colaboradores empezamos a preguntarnos qué importancia tenía la percepción de la estructura fina en la comunicación del canto natural. Percibir las sílabas invertidas es impresionante, pero el ave nunca emite sonidos como esos. Por lo que la siguiente cuestión que nos planteamos fue hasta qué punto detectaban los cambios acústicos naturales producidos en los cantos.

Mis compañeros ya habían descrito en otro artículo publicado en 2018 que el diamante cebra percibe mínimas diferencias en la estructura fina de los reclamos, que aportan información acerca del sexo y la identidad del emisor. Con

Diamante cebra

Discriminación de sonido

El canto del diamante cebra parece a oídos humanos una sucesión de temas idénticos, cada uno compuesto por sílabas concretas. Pero la estructura fina de cada tema difiere bastante y este pájaro reconoce las versiones del mismo tema. En los espectrogramas ilustrados, el tema natural aparece repetido como «sonido de fondo» (*arriba*). El mismo tema, pero con la segunda sílaba invertida en la estructura, era uno de los «sonidos nuevos» (*centro*) que se reprodujeron para ellos como experimento. Otro sonido nuevo se compuso reordenando las sílabas del tema. Los círculos blancos marcan las sílabas que habían sido invertidas o reordenadas.



ADAM FISHBEIN (*onda y espectrograma*); LIZ WAHID (*ilustración del diamante cebra*)


TIM FLACH

PERIQUITOS COMUNES

objeto de examinar su percepción de la estructura fina del canto, nos aprovechamos del hecho de que los cantos del diamante consisten en un único tema que se repite una y otra vez con las mismas sílabas y en el mismo orden, o por lo menos así lo creíamos. La verdad es que hay diferencias muy pequeñas en la pronunciación de una sílaba dada en cada interpretación del tema. Examinamos su aptitud para discriminar entre diferentes interpretaciones del mismo tema y descubrimos que es capaz de percibir fácilmente esas diferencias.

Eso significa que, aunque nos dé la impresión de que el canto del diamante cebra es una repetición del mismo tema, a él no le parece igual. Creemos, en cambio, que a través de la estructura fina capta gran cantidad de información sobre el estado de ánimo, la salud, la identidad individual y un largo etcétera, todo ello inapreciable para nuestro oído. Es razonable pensar que otras aves de canto aparentemente repetitivo compartan esa misma capacidad de percepción.

Tal vez uno se pregunte si esas pequeñas fluctuaciones del canto son accidentales o aleatorias, como las variaciones de la trayectoria que sigue una bola de béisbol lanzada con efecto hacia el bateador. De hecho, la clave de la estructura fina podría residir en el órgano fonador aviar. La especie humana articula los sonidos de las palabras con la cavidad bucal y la lengua, pero la única fuente sonora es la laringe, situada en la parte superior del cuello. En cambio, las aves emiten los sonidos con una singular estructura bifurcada situada sobre los pulmones, llamada siringe. Esta contiene dos fuentes de sonido, una en cada bifurcación, que el ave controla de forma independiente. Además, las contracciones de la musculatura siríngea de las aves canoras son las más rápidas conocidas de entre todos los vertebrados, con un control temporal del orden de milisegundos. La variación acústica fina no tiene su origen en el movimiento del pico, como ocurre análogamente en el hombre, sino que es controlada y percibida desde la misma fuente sonora.

El baile de la siringe

Todos estos estudios muestran en conjunto que las aves perciben el canto de modo claramente distinto a como creíamos. Cuando escuchamos música o la voz de otra persona, las melodías y las estructuras de las frases nos resultan esenciales; cuando escuchamos el canto de un ave, no podemos evitar hacerlo de la misma forma.

Pero no parece que les importen mucho los cambios de secuencia; a algunas les cuesta percibir hasta los más sencillos. En la especie humana, cuando se produce esa clase de manipulaciones en el habla o en la música, el mensaje o la melodía se interrumpen por completo. Pero las aves escuchan con mucha más atención los matices acústicos de los elementos individuales del canto, independientemente de la secuencia en la que se emitan. Además, perciben detalles que quedan fuera de nuestra capacidad auditiva.

Al pensar en cómo perciben su canto, quizá el baile sea una analogía mejor que el lenguaje o la música. Cuando se aprende una nueva rutina de baile, es preciso conocer bien el orden para ejecutar los movimientos de manera correcta; como cuando aprendí a enlazar un círculo *lindy* con un charlestón en mi clase de *swing*. Si una transición es defectuosa puede ocurrir que el movimiento entero se rompa en pedazos. Pero quien esté observando el baile no sacará mucha información del orden de los movimientos. En cambio, el público presta atención a la acrobacia, el ritmo y la variedad de movimientos, en lugar del orden o secuencia en que se ejecutan. Tal vez ocurra lo mismo con las aves canoras. Desde la perspectiva del ave emisora, elaborar bien la secuencia quizá sea fundamental para ejecutar debidamente los «movimientos»; en cambio, para la receptora, lo más importante quizá sean los movimientos individuales por sí mismos.

Esto no quiere decir que no existan paralelismos importantes entre el canto de las aves y el habla humana o la música. La capacidad de escuchar sonidos y de reproducirlos que demuestran tener la especie humana con el habla y las aves con el canto, denominada aprendizaje vocal, constituye un atributo bastante minoritario en el reino animal. Ni el chimpancé, nuestro pariente vivo más cercano, ni los demás primates parecen compartir esa habilidad. Los mamíferos que sí demuestran tener cierta aptitud (murciélagos, ballenas, elefantes, focas y leones marinos) no alcanzan el mismo grado de imitación que el ser humano y algunas aves (las canoras, los loros [psitácidos] y los colibrís [troquílidos]; otros grupos como las palomas [columbiformes], las gallinas [gallináceas] o los búhos y lechuzas [estrigiformes] carecen de esa capacidad). Y algo más extraordinario: investigadores como Erich Jarvis, de la Universidad Rockefeller, han mostrado que las vías neurales y los mecanismos moleculares que rigen el aprendizaje vocal y la producción sonora son similares en las aves canoras y en el ser humano, un ejemplo de evolución convergente; el estudio de las aves puede facilitar nuestra comprensión de la comunicación vocal humana. Pero, en definitiva, no perciben esos cantos de la forma que suponíamos.

Queda mucho por aprender sobre la percepción del canto en las aves. Diversos estudios han aportado pruebas de que sus reclamos transmiten información específica sobre aspectos del entorno, como podría ser la presencia de alimento o de depredadores; pero todavía desconocemos si existe algo parecido en sus cantos, tal vez integrado en la estructura fina. Tampoco sabemos cómo perciben la estructura fina de sus cantos en los entornos naturales, donde las ondas sonoras rebotan en el arbolado y los edificios y se solapan con toda una cacofonía de ruido ambiental.

Por último, un trabajo reciente ha mostrado que, en contra de la creencia arraigada de que solo cantan los machos de las especies canoras, las hembras también lo hacen. Este descubrimiento plantea una nueva cuestión: ¿acaso perciben machos y hembras el canto de forma distinta? Además, en muchas especies tropicales, ambos sexos cantan a dúo con tal coordinación que a un oyente humano le puede parecer un único canto. ¿Cómo se las arreglan para prestar atención al canto del compañero y emitir al mismo tiempo las notas correctas?

La próxima vez que escuche a un ave cantar, intente percibir su canto no como una melodía pegadiza o una simple frase, sino más bien como un baile de la siringe compuesto por movimientos rápidos y primorosamente coordinados, quizá dotado de tanta emotividad y trascendencia como el lenguaje humano o la música, pero expresado de forma distinta.

Adam Fishbein es investigador posdoctoral de la Universidad de California en San Diego. Estudia las bases cognitivas y neuronales de las interacciones sociales de los animales.



EN NUESTRO ARCHIVO

¿Es sincero el canto de las aves? William A. Searcy y Stephen Nowicki en *IyC*, agosto de 2008.

Imitación vocal en el mundo animal. Kendra Sewall en *IyC*, agosto de 2013.

La increíble diversidad de las aves canoras. Kate Wong en *IyC*, abril de 2020.



THOMAS FUCHS

CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

COMPUTACIÓN REVERSIBLE

Philip Ball | Los ordenadores del futuro podrían sortear un límite teórico respecto al mínimo gasto energético que requiere el procesamiento de la información

Por si no se había dado cuenta, los ordenadores están que arden... literalmente. El calor que desprende un portátil apoyado en el regazo puede hacer que nos asemos, y se calcula que los centros de datos consumen unos 200 teravatios hora cada año, una cifra equiparable al consumo energético de algunos países de tamaño medio. En conjunto, la huella de carbono de las tecnologías de la información y la comunicación se aproxima a la que genera el uso de combustibles en la industria aeronáutica. Los circuitos informáticos cada vez son más pequeños y están más densamente empaquetados, lo que eleva el riesgo de que se fundan por culpa de la energía disipada en forma de calor.

EN SÍNTESIS

El límite de Landauer postula que la computación tradicional incurre en un coste energético inevitable debido a la necesidad de borrar los bits de información guardados en la memoria.

La computación reversible, en la que no se elimina ningún dato, podría evitar la disipación de calor, pero parece exigir que los cálculos procedan con infinita lentitud.

Codificar la información en el momento lineal de las partículas que constituyen la corriente eléctrica podría permitir la computación reversible sin sacrificar la velocidad.

Ahora, el físico James Crutchfield, de la Universidad de California en Davis, y el estudiante de doctorado Kyle Ray han propuesto un nuevo método computacional que disiparía apenas una pequeña fracción del calor que producen los circuitos habituales. De hecho, su enfoque, descrito en un reciente artículo que aún no se ha sometido a revisión por pares, podría incluso llevar la disipación por debajo del mínimo teórico que imponen las leyes de la física a los ordenadores actuales. Eso reduciría enormemente la energía requerida para ejecutar los cálculos y refrigerar los circuitos. Y, según los investigadores, podría lograrse empleando dispositivos microelectrónicos ya existentes.

En 1961, el ya fallecido Rolf Landauer, físico del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, demostró que la computación tradicional incurre en un coste inevitable debido a las pérdidas energéticas (en esencia, por la generación de calor y entropía). Eso ocurre porque, en ocasiones, los ordenadores se ven obligados a borrar bits de información almacenados en sus circuitos de memoria para liberar espacio. Cada vez que un bit (con el valor 0 o 1) se restablece, se disipa cierta cantidad mínima de energía, que Ray y Crutchfield han bautizado como «landauer». Su valor depende de la temperatura ambiente: en el salón de nuestra casa, un landauer rondaría los 10^{-21} julios. (En comparación, una vela encendida emite unos 10 julios por segundo.)

Los científicos saben desde hace tiempo que el límite de Landauer con respecto a la mínima cantidad de calor que produce la computación puede sortearse si no borramos nada de información. Una tarea ejecutada de esta forma sería totalmente reversible, ya que no desechar ningún dato permite desandar todos los pasos. Podríamos pensar que ese proceso llenaría enseguida la memoria de un ordenador. Sin embargo, en los años setenta, el también investigador de IBM Charles Bennett demostró que, en vez de descartarla al final del cómputo, la información podía usarse para deshacer los resultados intermedios innecesarios, revirtiendo los pasos lógicos que condujeron a ellos y devolviendo el ordenador a su estado original [*véase* «Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo», por Charles H. Bennett y Rolf Landauer; Investigación y Ciencia, septiembre de 1985]. La pega es que, para evitar la transferencia de calor (y lograr que el proceso sea adiabático, en el argot de los físicos), en general, la secuencia de operaciones lógicas debe efectuarse con infinita lentitud. En cierto sentido, esta estrategia previene cualquier «calentamiento por fricción», pero a costa de tardar un tiempo infinitamente largo en realizar los cálculos.

De ser así, la solución no se antoja muy práctica. «Durante mucho tiempo, la creencia popular ha sido que la energía disipada en la computación reversible era proporcional a la velocidad», incide Michael Frank, científico computacional del Laboratorio Nacional de Sandia.

Hasta el límite, y más allá

En todo caso, la computación basada en el silicio ni siquiera se acerca al límite de Landauer: en la actualidad, produce algunos miles de landauers de calor por operación lógica, y resulta difícil concebir un futuro chip de silicio (por eficiente que sea) que logre bajar de unos 100 landauers. Pero Ray y Crutchfield creen que es posible obtener mejores resultados si se codifica la información de un modo distinto en las corrientes eléctricas:

no como pulsos de carga, sino en el momento lineal de las partículas en movimiento. Sostienen que eso permitiría la computación reversible sin necesidad de sacrificar la velocidad.

Los dos investigadores y sus colaboradores introdujeron la idea principal de la computación basada en la cantidad de movimiento en 2021. El concepto clave es que el momento de una partícula puede proporcionar una especie de memoria «gratuita», dado que encierra información sobre el movimiento pasado y futuro de la partícula, no solo sobre su estado instantáneo. «Antes, la información se almacenaba en términos posicionales: "¿Dónde está la partícula?"», explica Crutchfield. Por ejemplo, ¿en cuál de dos canales se encuentra un determinado electrón? «La computación basada en el momento utiliza datos de la posición y de la velocidad», añade.

La computación basada en el momento podría aumentar mil veces la eficiencia energética

Esa información extra puede aprovecharse para realizar computación reversible, siempre que las operaciones lógicas se completen en mucho menos tiempo del que tarda un bit en alcanzar el equilibrio térmico con su entorno, ya que eso aleatoriza los movimientos del bit y embarulla la información. En otras palabras, «la computación basada en el momento requiere que el dispositivo trabaje a gran velocidad», resume Crutchfield. Para que funcione, «hay que calcular rápido»; es decir, de forma no adiabática.

Los investigadores sopesaron cómo usar esa idea para implementar una permutación de bits, una operación lógica en la que dos bits intercambian su valor. Tal proceso no descarta información, solo la reconfigura, por lo que, en teoría, no comporta costes de borrado.

No obstante, si la información se codifica solo en la posición de las partículas, la permutación de bits (por ejemplo, intercambiar las partículas de dos canales distintos) hace que sus identidades se confundan y no puedan distinguirse a partir de sus estados inicial y final. Pero si las partículas poseen momentos opuestos, permanecen bien diferenciadas, y la operación crea un cambio genuino y reversible.

Dispositivos prácticos

Ray y Crutchfield han descrito cómo se podría plasmar su idea en un dispositivo práctico, en concreto, en los bits cuánticos (o qubits) de flujo superconductor, que son los que emplean la mayoría de los ordenadores cuánticos actuales. «¡Somos parásitos de la comunidad de computación cuántica!», admite alegremente Crutchfield. Esos qubits constan de bucles superconductores interrumpidos por uniones de Josephson (UJ), estructuras que intercalan una fina capa de un material no superconductor entre dos superconductores.

En los circuitos con UJ, la información suele codificarse en el sentido de la «supercorriente», el cual se puede conmutar mediante radiación de microondas. Pero las supercorrientes poseen cantidad de movimiento, por lo que también resultan aptas para la computación basada en el momento. Las simulaciones de Ray y Crutchfield sugieren que, en ciertas condiciones, debería ser posible implementar su método en circuitos con UJ. Si se enfriaran a las temperaturas del helio líquido, esos circuitos podrían efectuar una permutación de bits en menos de 15 nanosegundos.

«Nuestra propuesta se basa en un sustrato específico para ser lo más concreta posible y estimar con precisión las energías necesarias, pero es mucho más general», subraya Crutchfield. En principio, debería funcionar con circuitos electrónicos normales (si bien enfriados a temperaturas criogénicas) o incluso con pequeños dispositivos mecánicos cuidadosamente aislados y con partes móviles que posean momento. Sin embargo, Crutchfield considera que un enfoque basado en bits superconductores podría resultar idóneo, pues «son microdispostivos corrientes y que admiten muy bien un aumento de escala».

Crutchfield lo sabe de sobra: mientras trabajaba con Michael Roukes y sus colegas en el Instituto de Tecnología de California, determinó el coste de borrar un bit en un dispositivo con UJ y demostró que raya en el límite de Landauer. En los años ochenta, Crutchfield y Roukes incluso actuaron como consultores de IBM cuando la compañía trató de construir un ordenador reversible con UJ, proyecto que acabó abando-

nando porque, en aquella época, los requisitos de fabricación eran demasiado exigentes.

Computación balística

Aprovechar la velocidad de una partícula para efectuar cálculos no es una idea del todo novedosa. La computación basada en el momento se parece mucho a un tipo de computación reversible propuesto en los años ochenta: la computación balística, donde la información se codifica en objetos o partículas que se mueven libremente (por inercia) a través de un circuito y transportan consigo una señal, que se usa de forma repetida para ejecutar múltiples operaciones lógicas. Si las interacciones con otras partículas son elásticas, no se perderá energía. En un dispositivo así, una vez que se han «lanzado» los bits balísticos, ellos solos alimentan el proceso sin necesidad de fuentes de energía adicionales. La computación será reversible mientras los bits sigan rebotando a lo largo de su trayectoria: la información solo se borra (con la consiguiente disipación de energía) al leer sus estados.

En la computación balística, la velocidad de una partícula simplemente sirve para transportarla a través del dispositivo, posibilitando que la partícula transfiera información desde la entrada hasta la salida, indica Crutchfield. Sin embargo, en la computación basada en el momento, la velocidad y la posición de una partícula permiten que esta exprese una secuencia única e inequívoca de estados durante un cálculo. Esa es la clave de la reversibilidad y de la baja disipación, agrega Crutchfield, ya que podemos saber con exactitud dónde ha estado cada partícula.

Los investigadores, incluido Frank, llevan decenios trabajando en la computación balística reversible. Uno de los retos estriba en que, en su formulación inicial, la computación balística es dinámicamente inestable. Eso se debe, por ejemplo, a que las colisiones entre las partículas pueden ser caóticas y, en consecuencia, muy sensibles a mínimas fluctuaciones aleatorias. Y, entonces, no es posible invertir el proceso. No obstante, los investigadores han hecho avances. Así, Kevin Osborn y Waltraut Wustmann, ambos de la Universidad de Maryland, han propuesto usar circuitos con UJ para crear un «registro de desplazamiento», un circuito balístico reversible donde la salida de una puerta lógica conforma la entrada de la siguiente en una secuencia de operaciones biestables (de «*flip-flop*»).

«Los circuitos superconductores constituyen una buena plataforma para evaluar la computación reversible», opina Osborn. Y añade que sus circuitos con UJ no parecen muy distintos de los propuestos por Ray y Crutchfield, así que podrían ser la mejor opción para poner a prueba su idea.

«Diría que todos los grupos hemos confiado en nuestra intuición de que estos métodos pueden ofrecer un mejor equilibrio entre eficiencia y velocidad que los enfoques tradicionales de la computación reversible», aventura Frank. Ray y Crutchfield «probablemente han realizado el trabajo más riguroso hasta la fecha para demostrarlo a nivel teórico y mediante la simulación de dispositivos individuales». Aun así, Frank advierte de que las diversas propuestas de computación balística y basada en el momento «todavía están lejos de convertirse en técnicas prácticas».

Crutchfield se muestra más optimista. «En realidad, dependerá de si la gente respalda su desarrollo», opina. Cree que en un par de años podríamos tener pequeños circuitos con UJ capaces de llevar a cabo computación basada en el momento, y que los primeros microprocesadores completos llegarán antes del final de la década. A la larga, espera que la computación basada en el momento de uso comercial permita aumentar al menos mil veces la eficiencia energética de las técnicas actuales. «Imagine si una granja de servidores de Google, que se aloja en un enorme almacén y usa 1000 kilovatios en tareas de computación y refrigeración, redujera su consumo a tan solo 1 kilovatio, equivalente al de unas cuantas bombillas», plantea Crutchfield.

Pero los beneficios de este nuevo enfoque no se limitarían a un abaratamiento de los costes energéticos, concluye el físico. «La computación basada en el momento conducirá a un cambio conceptual en nuestra forma de entender el procesamiento de la información.»

Philip Ball, doctor en física por la Universidad de Bristol, fue editor de *Nature* durante más de veinte años. Ha escrito numerosos libros y artículos de divulgación científica.



EN NUESTRO ARCHIVO

Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo. Charles H. Bennett y Rolf Landauer en *IyC*, septiembre de 1985.

Rolf Landauer: A lomos de los electrones. Gary Stix en *IyC*, noviembre de 1998.

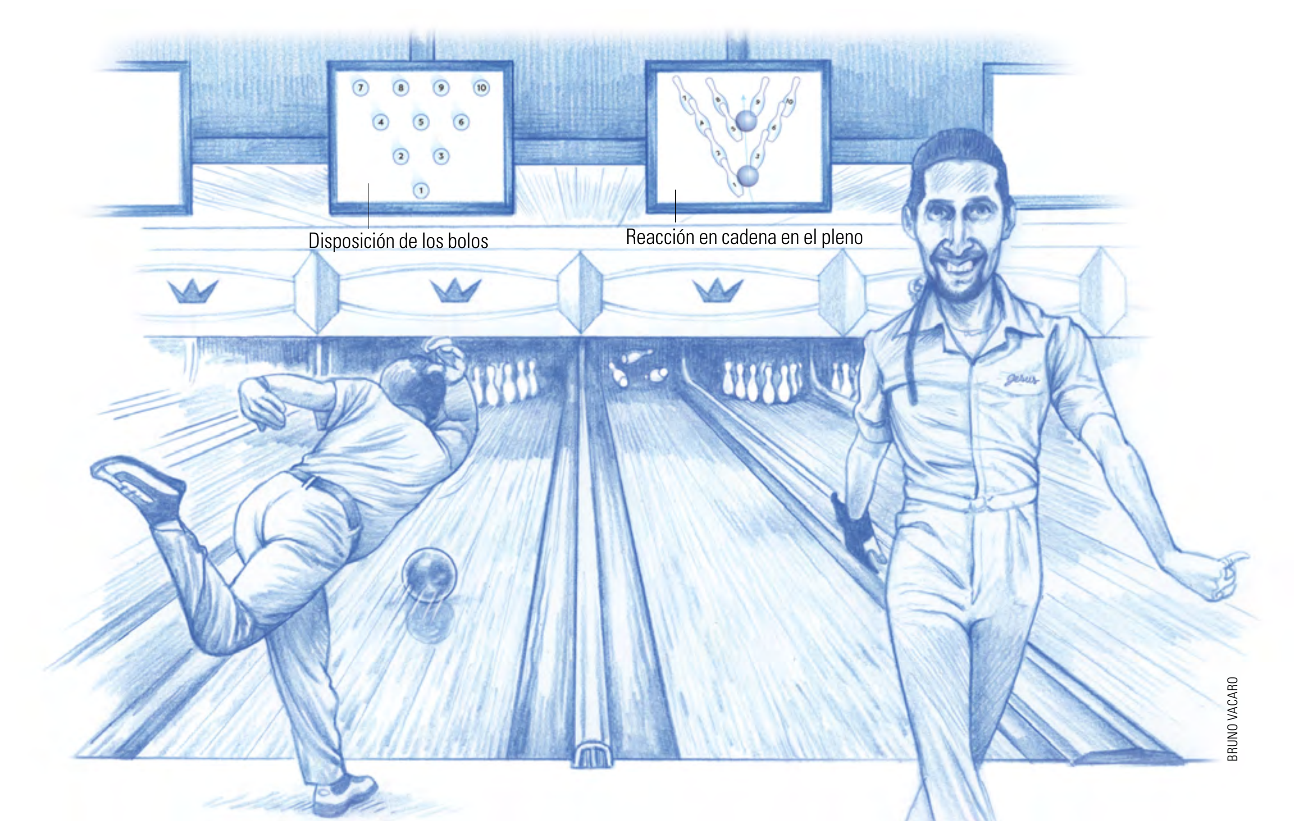
Hacia la computación de energía cero. Miguel López Suárez, Igor Neri y Luca Gammaitoni en *IyC*, octubre de 2017.

HACER UN PLENO

En el juego de bolos, para derribar todos los palos de un solo tiro debemos aprovechar el lubricante que cubre el suelo de la pista, la asimetría del núcleo de la bola y otras sutilezas físicas.

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Tras cinco pasos de impulso, el hombre del mono violeta lanza su bola imprimiéndole un movimiento de rotación. La trayectoria rectilínea que al comienzo describe la bola parece conducirla irremisiblemente al canalón. ¿Un tiro fallido? En absoluto: en el último momento, la trayectoria de la bola se curva y va a golpear al bolo central, y luego los tres situados inmediatamente detrás del primero. Proyectados con fuerza, esos bolos hacen caer a todos los demás mediante una reacción en cadena, ¡y ahí tenemos el pleno! Jesús Quintana (*a la derecha de la ilustración*) se alboroza, al fin está listo para el partido previsto contra el Dude y su equipo en el filme *El gran Lebowski*, de los hermanos Cohen. Y es que «nadie le falta el respeto a Jesús», sobre todo después de un pleno. ¿Cómo lo hizo? El efecto que se comunica a la bola al lanzarla constituye un ingrediente importante. Pero en los bolos, como en tantas cosas, lo esencial es invisible a nuestros ojos: el lubricado de la pista, el revestimiento de la bola y la no esfericidad de su núcleo forman el meollo de las sutilezas más importantes de la física del juego de bolos.



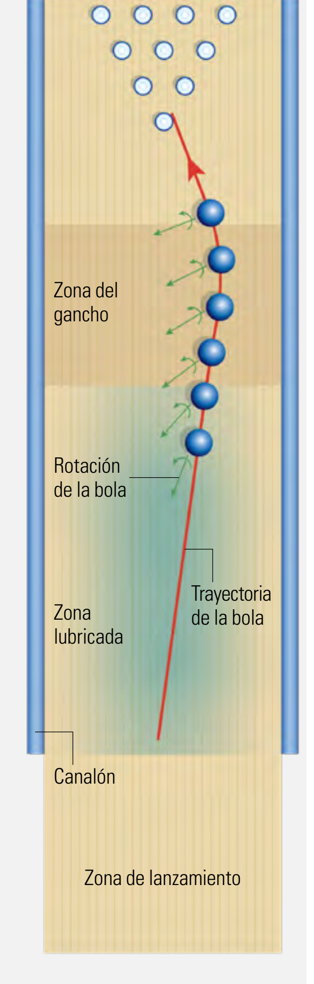
Abatir todos los bolos

El objeto de este juego es tumbar, golpeándolos con una bola, diez bolos dispuestos en triángulo. Más fácil dicho que hecho... Una dificultad la plantea la longitud de la pista, la distancia que separa la bola de los bolos: 60 pies (unos 18 metros). Otra resulta de la separación entre los bolos: los dos situados en la base del triángulo se hallan en los bordes de una pista de 1,05 metros de ancho. Por último, se prohíben los rebotes en los bordes de la pista: a un lado y otro de la misma hay sendos canalones, de modo que la bola que caiga en ellos ya no regresará a la pista.

¿Cómo entonces derribar todos los palos de un solo tiro y hacer un pleno? La solución más eficaz es provocar la reacción en cadena (*véase la ilustración de la página anterior*) golpeando con la bola primero los bolos 1 y 3, de modo que el 1 tumbe los bolos 2, 4 y 7, y el 3 los 6 y 10. La bola golpea luego los bolos 5 y 9, con el 5 al final derribando el 8 (para un zurdo, la secuencia es simétrica).

La trayectoria ideal

Para optimizar las posibilidades y lograr un pleno, lo mejor es golpear el bolo 1 levemente al sesgo. Para conseguir el ángulo óptimo de 6 grados, los expertos imprimen a la bola una gran velocidad de rotación cuando la lanzan (*flechas verdes*). Durante la primera parte de la trayectoria, la bola se desliza sobre la pista porque esta se halla cubierta de lubricante (*en azul, con una intensidad de color proporcional al espesor del lubricante*) con un perfil de engrase que depende de la ocasión (aficionados, competición, etcétera). Cuando la bola llega a la parte no lubricada, las fuerzas de rozamiento confieren a la trayectoria una forma parabólica, ganchuda, y modifican la intensidad y dirección de la rotación. En el último tramo de la trayectoria, la bola rueda y así se mueve en línea recta.



BRUNO VACARO

Lograr estas colisiones requiere que la bola transmita suficiente energía a los bolos al chocar con ellos. Por tanto, debe ser lo bastante pesada y rápida. Dado que la masa de los bolos está reglamentada entre 1531 y 1645 gramos, la de la bola debe ser claramente mayor. Cuanto más ligera sea la bola, más se desviará y lentificará después de cada choque. El reglamento impone que el coeficiente de restitución (el cociente entre las velocidades relativas del bolo y la bola, respectivamente, después y antes de la colisión) debe estar comprendido entre un 65 y un 75 por ciento. Así, los buenos jugadores prefieren las bolas pesadas, pero no en exceso: una bola demasiado pesada podría dañar la pista y suponer unos esfuerzos excesivos para la articulación del puño. Por ello, la reglamentación limita la masa a 7,25 kilogramos, y los jugadores experimentados prefieren las bolas de entre 6 y 7 kilos. Así, la desviación máxima de la dirección de la bola tras chocar con un bolo está comprendida entre 0 y 10 grados.

Una trayectoria muy bien ajustada

Con una bola de masa adecuada, el lanzador debe entonces apuntar bien a fin de golpear al bolo 1, por ejemplo, suavemente por la derecha de modo que ese bolo salga hacia la izquierda, y apañárselas para que, tras la colisión, la bola se desvíe hacia el bolo 3 a su derecha. Si a la bola le damos una trayectoria rectilínea paralela a los bordes de la pista, la zona blanco que queremos alcanzar mide 1,3 centímetros de ancho: todo un reto, aun para un experto.

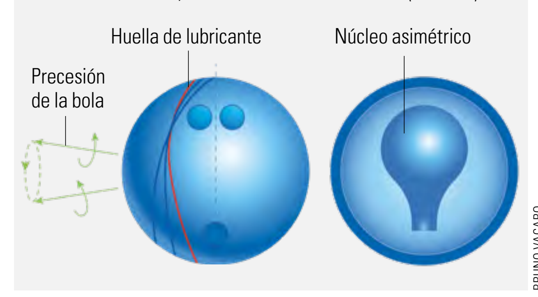
¿Cómo aumentar las posibilidades de hacer un pleno? La solución es geométrica: incidir al sesgo sobre los bolos. La experiencia muestra que el ángulo de incidencia ideal es de 6 grados respecto al eje de la pista. El problema es que, para lograrlo lanzando la bola en línea recta, hay que situarse a un costado de la mitad de la pista: el ángulo máximo que puede conseguirse en una pista dada, habida cuenta de su ancho y longitud, es de 1,67 grados.

Por tanto, no basta moverse. Dar una trayectoria curva a la bola es la única opción. Si la hacemos rotar sobre sí misma según un eje paralelo al eje de la pista (desde su posición, el jugador diestro la ve girar en el sentido contrario al de las agujas del reloj), el rozamiento entre

la bola y la pista produce una fuerza lateral regida por las leyes de Coulomb: en cuanto hay deslizamiento entre la bola y la pista, la fuerza de rozamiento es igual al producto del peso de la bola por el coeficiente de rozamiento entre la bola y la pista. Como esa fuerza es constante, según las leyes de la dinámica, la trayectoria de la bola es un parábola; pero a medida que cesa el deslizamiento y la fuerza se anula, la trayectoria es rectilínea y uniforme (a velocidad constante). En estas condiciones, es teóricamente posible conseguir una trayectoria que se remate en los 6 grados deseados sin que la bola se salga de la pista y caiga en el canalón. Pero la sensibilidad de la desviación al valor del coeficiente de rozamiento y la brevedad de la fase parabólica, habida cuenta de las velocidades (de traslación y rotación) que podemos comunicar a la bola, la hacen imposible de obtener en la práctica.

Los secretos de una bola

En la primera fase de la trayectoria, los puntos de la bola que entran en contacto con la pista se cubren de lubricante (*izquierda*). Para que estas superficies no vuelvan a entrar en contacto con la pista y permitir que las bolas «adquieran gancho» cuando lleguen a la zona no lubricada, las bolas se conciben de modo que su eje de rotación ejecute un movimiento de precesión. Por ello, en su interior hay un núcleo de material denso, carente de simetría esférica (*derecha*).



BRUNO VACARO

Lubricante, pero no demasiado

Ocurre que interviene un elemento invisible al ojo desprevenido: la cabecera de la pista (el comienzo) está cubierta de lubricante. Este se usa para reducir lo más posible la fuerza de rozamiento tras el impacto de la bola en la pista justo después de lanzarla. Aunque la pista y la bola ya estén tratadas para reducir la fricción, sin el lubricante el calentamiento llegaría a 500 ºC y, a la larga, resultaría destructivo. Lubricar la pista reduce más todavía los rozamientos y, por tanto, el calentamiento, pero eso dificulta conseguir una trayectoria curva. Y esta es la causa de que la pista no esté lubricada en toda su longitud. Hay muchas formas de repartir el lubricante: unas facilitan el juego (se engrasa más el centro que los bordes, lo que devuelve las bolas hacia el centro) y otras lo dificultan (engrase uniforme en todo el ancho). Como resultado, la bola describe su trayectoria en tres fases: un tramo recto, en que la bola se desliza sobre el lubricante girando sobre sí misma, luego un tramo parabólico (llamado «gancho») sobre la pista seca y, al final, un tramo recto en que la bola rueda sin deslizar.

Todo parece ajustado, pero, por desgracia, el diablo anida en los detalles: durante toda la trayectoria en contacto con la parte lubricada, la superficie de la bola que entra en contacto con la pista se cubre de lubricante. Como la bola está dotada de un movimiento de rotación, se trata de un círculo. Pero una vez llegada a la parte seca de la pista, esta misma superficie entra en contacto con la madera: la bola sigue deslizándose y no describe el mismo gancho como si estuviera seca. Solo cuando todo el lubricante acumulado se redeposite en la pista, la bola describirá realmente un gancho.

La solución es procurar que la superficie de la bola que entra en contacto con la pista esté siempre «seca». ¿Cómo? Con una bola cuyo interior no sea homogéneo. En el centro de la bola se halla un núcleo más denso que el resto y cuya forma no es esférica. Se genera así un movimiento de precesión: el eje de rotación de la bola ya no es fijo. El resultado es que hay siempre una porción de superficie seca que entra en contacto con la pista. Existe toda una diversidad de formas de núcleo. Añádanse a esto las distintas posibilidades de revestimiento exterior, del estado de la superficie... y dispondremos de una diversidad notable de bolas para elegir, seamos o no expertos, y con las cuales lograr una partida perfecta, o sea, doce plenos seguidos, y merecer un pleno... ¡respeto!

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad La Sorbona, en París.



PARA SABER MÁS

Bowling frames: Paths of a bowling ball. D. C. Hopkins y J. D. Patterson en *American Journal of Physics*, vol. 45, n.º 3, marzo de 1977.

What makes bowling balls hook? C. Frohlich en *American Journal of Physics*, vol. 72, n.º 9, agosto de 2004.

EN NUESTRO ARCHIVO

Pleno en la bolera. Patrick David en *IyC*, diciembre de 2002.

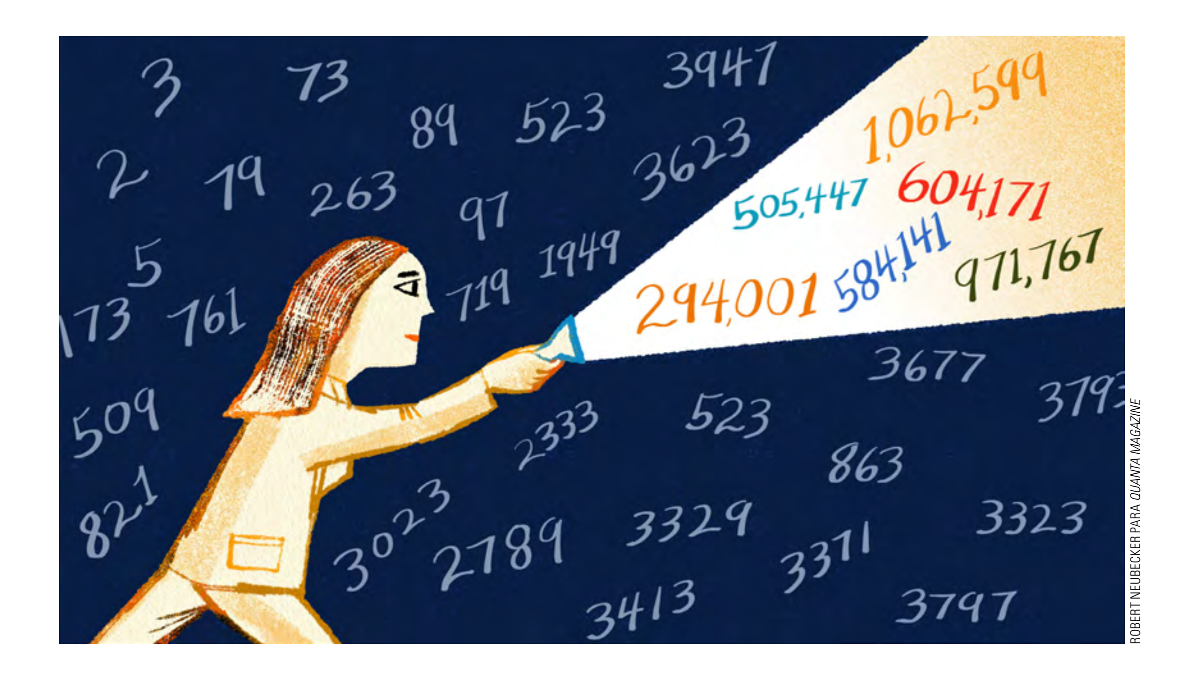
LA DELICADEZA DE LOS NÚMEROS PRIMOS

La distribución de los números primos se ha estudiado durante milenios. Resultados recientes acerca de un curioso tipo de primos ofrecen una nueva visión sobre cuán diseminados están

Patrick Honner

Si siguió las noticias matemáticas a lo largo del pasado mes de julio, sabrá que el especialista en teoría de números James Maynard, de 35 años, recibió la medalla Fields, el máximo honor para un matemático. A Maynard le motivan las cuestiones que son lo bastante simples como para explicárselas a un alumno de secundaria, pero lo bastante complejas como para desconcertar a los matemáticos durante siglos. Una de esas preguntas sencillas es la siguiente: conforme avanzamos por la recta numérica, ¿debe haber siempre números primos que estén próximos entre sí?

Puede que el lector se haya percatado de que los matemáticos viven obsesionados con los números primos. ¿Qué los atrae? Quizá sea el hecho de que los números primos encarnan algunas de las estructuras y los misterios más fundamentales de las matemáticas. Los primos cimentan el universo de la multiplicación, al permitirnos clasificar y categorizar cada número natural mediante una factorización única. Sin embargo, aunque llevamos explorando los números primos desde los albores de la multiplicación, todavía no estamos seguros de dónde surgirán, cómo de diseminados se hallan o cuán cerca han de estar unos de otros.



ROBERT NEUBECKER PARA *QUANTA MAGAZINE*

Hasta donde sabemos, los números primos no obedecen a ninguna pauta simple.

Nuestra fascinación por estos objetos básicos ha llevado a la invención, o el descubrimiento, de cientos de tipos de números primos: los primos de Mersenne (que pueden expresarse de la forma $2^n - 1$, donde n es un número natural), los equilibrados (cada uno de los cuales es igual a la media aritmética de los números primos anterior y siguiente) o los de Sophie Germain (números primos p tales que $2p + 1$ también es primo), por citar algunos ejemplos.

El interés por esos conjuntos especiales de números primos creció al jugar con ellos y descubrir nuevas peculiaridades. Eso mismo ha sucedido con los números primos «delicados», una reciente adición a la lista que ha generado algunos resultados sorprendentes acerca de una cuestión de lo más elemental: ¿cómo de frecuentes o inusuales son ciertos tipos de números primos?

Para comprender mejor esta pregunta, empecemos considerando uno de los primeros aspectos intrigantes que aprende cualquier aficionado a la aritmética: hay infinitos números primos. Euclides lo demostró hace 2000 años mediante una de las pruebas por reducción al absurdo más famosas de toda la historia de las matemáticas. El sabio griego partió de la premisa de que solo existía una cantidad finita n de números primos e imaginó una lista ordenada que los contuviera a todos:

$$p_1, p_2, p_3, \ldots, p_n.$$

Entonces tuvo una idea brillante: definió un número q de la forma

$$q = p_1 \times p_2 \times p_3 \times \cdots \times p_n + 1.$$

Vemos que q no pertenece a la lista original, porque es mayor que cualquiera de sus elementos. Así que, si existe un conjunto finito de números primos, ese número q no puede formar parte de él. Pero, en tal caso, tendría que poseer algún divisor aparte de sí mismo y el 1. Eso implica, a su vez, que q debería ser divisible por algún elemento de la lista; sin embargo, la forma de q asegura que, al dividirlo entre cualquiera de ellos, se obtiene siempre un resto igual a 1. Concluimos, pues, que q no es primo ni divisible por ningún primo, lo cual es un absurdo que resulta de suponer que hay una cantidad finita de números primos. Para evitar esta contradicción, deben existir infinitos primos.

Dado que hay infinitos, cabría pensar que es fácil encontrar números primos de cualquier tipo, pero una de las siguientes cosas que descubre un detective aritmético es lo diseminados que llegan a estar los números primos. Un ejercicio sencillo sobre los «espacios» que existen entre primos consecutivos arroja una conclusión harto sorprendente.

Entre los diez primeros números primos,

$$2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29,$$

hay tramos que constan de uno o más números compuestos (aquellos que no son primos, como 4, 12 o 27). Podemos medir tales huecos o «lagunas» contando los números comprendidos entre dos primos consecutivos: de este modo, existe un espacio de longitud 0 entre 2 y 3; uno de longitud 1 entre 3 y 5 o entre 5 y 7; uno de longitud 3 entre 7 y 11, y así sucesivamente. El mayor salto de esta lista se produce entre 23 y 29, donde hallamos una secuencia de cinco números compuestos (24, 25, 26, 27 y 28).

Y he aquí lo asombroso: esas lagunas de números compuestos pueden ser arbitrariamente grandes, es decir, existen números primos consecutivos tan alejados entre sí como queramos. Y quizás igual de sorprendente es lo fácil que resulta demostrar esta afirmación.

Ya hemos encontrado una laguna con 5 elementos. ¿Habrá una de longitud 6? En vez de escudriñar las tablas de primos con la esperanza de dar con una, la construiremos nosotros mismos. Para ello, usaremos la función factorial, que aparece en combinatoria y en otras fórmulas básicas. Por definición,

$$n! = n \times (n-1) \times (n-2) \times \cdots \times 3 \times 2 \times 1.$$

Así, por ejemplo,

$$3! = 3 \times 2 \times 1 = 6,$$
$$5! = 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 120.$$

Ahora, vamos a generar nuestra laguna de números compuestos. Consideremos la siguiente sucesión de números naturales consecutivos:

$$7! + 2,\ 7! + 3,\ 7! + 4,\ 7! + 5,\ 7! + 6,\ 7! + 7.$$

Dado que

$$7! = 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1,$$

el primero de esos números, 7! + 2, es divisible por 2, como podemos verificar sacando factor común:

$$7! + 2 = 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 + 2 \\ = 2(7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 1 + 1).$$

Asimismo, el segundo número, 7! + 3, es divisible por 3, ya que

$$7! + 3 = 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 + 3 \\ = 3(7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 2 \times 1 + 1).$$

De manera similar,

7! + 4 es divisible por 4;
7! + 5 es divisible por 5;
7! + 6 es divisible por 6;
7! + 7 es divisible por 7.

Por lo tanto, nuestra sucesión es un conjunto de seis números compuestos consecutivos. Hemos obtenido así una laguna formada por al menos 6 elementos.

Es fácil generalizar esta estrategia para cualquier número natural n. La sucesión

$$n! + 2,\ \ n! + 3,\ \ n! + 4,\ \ \ldots,\ \ n! + n$$

es una secuencia de $n - 1$ números compuestos consecutivos, lo cual significa que, para cualquier n, existe una laguna de números compuestos con al menos $n - 1$ elementos. Eso demuestra que los espacios entre primos consecutivos pueden ser arbitrariamente grandes y, por consiguiente, en la lista de números naturales habrá lugares donde los primos más cercanos entre sí estén separados por 100, 1000 o incluso 1.000.000.000 de números compuestos.

Esos resultados evidencian un conflicto clásico: hay infinitos números primos, pero, al mismo tiempo, dos primos consecutivos pueden estar arbitrariamente alejados. Más aún, existen infinitas parejas de números primos consecutivos que se encuentran próximos entre sí. ¿Cómo de próximos? Hace unos diez años, el trabajo pionero de Yitang Zhang desencadenó una carrera para reducir la distancia y probar la conjetura de los primos gemelos, que postula la existencia de infinitos pares de primos que difieren en tan solo 2 unidades. Esta conjetura constituye una de las cuestiones abiertas más famosas de las matemáticas, y el propio Maynard ha hecho contribuciones importantes en pos de su demostración.

Ese conflicto también se halla presente en algunos resultados recientes sobre los primos delicados. Para hacernos una idea de qué son estos números y dónde podrían encontrarse, reflexionemos un momento sobre esta extraña pregunta: ¿existe algún número primo de dos cifras que siempre se torne compuesto al efectuar cualquier cambio en el dígito de las unidades?

Para entender el concepto de delicadeza, tomemos el número 23. Sabemos que es primo, pero ¿qué sucede si cambiamos la cifra de las unidades? Los números 20, 22, 24, 26 y 28 son pares y, por lo tanto, compuestos; 21 es divisible por 3; 25 es divisible por 5, y 27 es divisible por 9. Hasta aquí, perfecto. Sin embargo, al sustituir el dígito de las unidades por 9, obtenemos 29, que sigue siendo primo. Así que el número 23 no pertenece al tipo de primos que buscamos.

¿Qué ocurre con el 37? Como acabamos de ver, no es necesario comprobar los números pares o terminados en 5, lo que nos deja el 31, el 33 y el 39. Como el 31 también es primo, el 37 tampoco nos sirve.

¿Existe realmente algún número como el que buscamos? La respuesta es afirmativa, pero hemos de llegar al 97 para encontrarlo: 97 es primo, pero 91 (divisible por 7), 93 (divisible por 3) y 99 (también divisible por 3) son compuestos, igual que 95 y los números pares.

Un número primo es delicado si, al cambiar cualquiera de sus dígitos por cualquier otra cifra, deja de ser primo

Se dice que un número primo es delicado si, al sustituir uno de sus dígitos (el que sea) por otra cifra cualquiera, deja de ser primo. Hemos visto que el 97 es delicado con respecto al dígito de las unidades (dado que al cambiarlo siempre se obtiene un número compuesto), pero ¿satisface el criterio completo para ser un primo delicado? Enseguida vemos que no, pues si cambiamos la cifra de las decenas por un 1, obtenemos 17, que es primo (como 37, 47 y 67, que también lo son).

De hecho, no existe ningún primo delicado de dos cifras. La siguiente tabla, que recoge todos los números entre 10 y 99, y donde se han sombreado los primos, nos permite constatarlo:

10	**11**	12	**13**	14	15	16	**17**	18	**19**
20	21	22	**23**	24	25	26	27	28	**29**
30	**31**	32	33	34	35	36	**37**	38	39
40	**41**	42	**43**	44	45	46	**47**	48	49
50	51	52	**53**	54	55	56	57	58	**59**
60	**61**	62	63	64	65	66	**67**	68	69
70	**71**	72	**73**	74	75	76	77	78	**79**
80	81	82	**83**	84	85	86	87	88	**89**
90	91	92	93	94	95	96	**97**	98	99

Todos los números de una misma fila comparten el dígito de las decenas, y todos los números de una misma columna, el de las unidades. El hecho de que el 97 sea el único número sombreado de su fila refleja que es un primo delicado con respecto a las unidades; sin embargo, en su columna hay otros cuatro primos, y eso indica que no es delicado con respecto a las decenas.

Para ser delicado, un primo de dos cifras tendría que ser el único número sombreado de su fila y de su columna. Y, como se aprecia en la tabla, ninguno cumple esa condición. ¿Y qué sucede con los números de tres cifras? A continuación vemos una tabla similar, que muestra la disposición de los primos comprendidos entre 100 y 199, y donde se han omitido los números compuestos:

	101		103				107		109
			113						
							127		
	131						137		139
									149
	151						157		
			163				167		
			173						179
	181								
	191		193				197		199

Observamos que el 113 es el único número de su fila, lo cual indica que es delicado con respecto a las unidades. Pero no es el único de su columna, ya que algunos cambios en las decenas producen primos (como 103 o 163). Puesto que no hay ningún número que aparezca él solo en su fila y en su columna, advertimos de inmediato que ningún primo de tres cifras entre 100 y 199 nos garantiza que vayamos a obtener un número compuesto al reemplazar el dígito de las unidades o el de las decenas. En otras palabras, en dicho intervalo tampoco existe ningún primo delicado. Y ni siquiera hemos tenido que comprobar las centenas: para ser delicado, un número primo de tres cifras tendría que evitar otros primos en las tres direcciones de una tabla tridimensional.

¿Acaso no existen los primos delicados? A medida que seguimos recorriendo la recta numérica, los números primos tienden a estar más dispersos, lo cual reduce las posibilidades de que se encuentren en las filas y columnas de esas tablas multidimensionales. Sin embargo, los números grandes poseen más dígitos, y la probabilidad de que un primo sea delicado decrece con cada nueva cifra.

Pero si no nos rendimos, descubriremos que sí existen primos delicados. El más pequeño es 294.001. Al sustituir cualquiera de sus dígitos, se obtiene un número compuesto (por ejemplo, 794.001 o 284.001). Y hay más: los siguientes son

505.447, 584.141, 604.171,
971.767, 1.062.599, ...

De hecho, esta secuencia no acaba nunca: el célebre matemático Paul Erdős demostró la existencia de infinitos primos delicados. Y ese no fue más que el primero de muchos resultados sorprendentes acerca de estos curiosos números.

Por ejemplo, Erdős no solo demostró que existen infinitos primos delicados, sino también que eso es cierto en cualquier base. De modo que, si elegimos representar los números en el sistema binario, ternario o hexadecimal, seguimos teniendo asegurada la existencia de un sinfín de primos delicados.

Y no solo son infinitos: también representan un porcentaje no nulo de todos los números primos. Eso significa que el cociente entre el número de primos delicados y el número total de primos es mayor que cero. Hablando en términos matemáticos, una «proporción positiva» de todos los números primos son delicados, como demostró el medallista Fields Terence Tao en 2010. Los primos en sí mismos no constituyen una proporción

positiva de todos los números, ya que su densidad disminuye a medida que avanzamos en la recta numérica. Sin embargo, entre ellos seguirán apareciendo primos delicados con suficiente frecuencia como para mantener la razón entre estos y el total de números primos por encima de cero.

Puede que el hallazgo más impactante sea un resultado de 2020, relacionado con una nueva variación de estos extraños números. Flexibilizando el concepto de dígito, los autores reimaginaron la forma en que se representan los números. La idea es pensar que un número cualquiera, como el 97, viene precedido de una infinidad de ceros:

...0000000097.

Cada cero a la izquierda se considera una cifra más, y la cuestión de la delicadeza se puede extender a estas nuevas representaciones. ¿Podría haber primos «ampliamente delicados», es decir, números primos que siempre se vuelvan compuestos al cambiar cualquiera de sus cifras, incluidos los ceros a la izquierda? Gracias al trabajo de los matemáticos Michael Filaseta y Jeremiah Southwick, sabemos que, sorprendentemente, la respuesta es afirmativa. Y no solo existen los primos ampliamente delicados, sino que también hay infinitos.

Los números primos proporcionan una serie infinita de rompecabezas con los que pueden entretenerse profesionales y aficionados. Tal vez nunca logremos desentrañar todos sus misterios, pero podemos estar seguros de que los matemáticos continuarán descubriendo, e inventando, nuevos tipos de números primos que explorar.

Patrick Honner es profesor de matemáticas y computación en un instituto de secundaria de Brooklyn, Nueva York. Reconocido divulgador, en 2013 recibió el Premio Presidencial a la Excelencia en la Enseñanza de Matemáticas y Ciencias de EE.UU.



Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia.



EN NUESTRO ARCHIVO

A la búsqueda de números primos. Carl Pomerance en *IyC*, febrero de 1983.
Cribas y números primos. Juan M. R. Parrondo en *IyC*, agosto de 2005.
Un nuevo patrón en los números primos. Bartolo Luque en *IyC*, julio de 2019.
La hipótesis de Riemann. Bartolo Luque en *IyC*, de diciembre de 2020 a marzo de 2021.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza,
Javier Grande Bardanca,
Yvonne Buchholz

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307, 3.º 2.ª
08009 Barcelona
(España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

PRODUCCIÓN

InboundCycle
Plaza Francesc Macià, 8-9, 7B
08029 Barcelona (España)
Teléfono 936 116 054

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN:

Javier Grande: *Apuntes*; **Andrés Martínez:** *Apuntes*, *La protección de la biodiversidad no es una causa perdida*, *Misterios del corazón y de la cabeza* (ed.) y *Así escuchan las aves su canto* (ed.); **Pedro Pacheco:** *Apuntes*, *Desinformación climática en la escuela*, *Misterios del corazón y de la cabeza* (trad.) y *Así escuchan las aves su canto* (trad.); **José Óscar Hernández Sendín:** *Apuntes*, *Vórtices marinos*, *Computación reversible* y *La delicadeza de los números primos*; **Fabio Teixidó:** *Apuntes*; **Juan Pedro Adrados:** *El increíble viaje de las Voyager*; **Sixto Castro:** *Por qué la inteligencia artificial no puede querer nada*; **J. Vilardell:** *Hacer un pleno.*

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF
Laura Helmuth

PRESIDENT
Kimberly Lau

EXECUTIVE VICE PRESIDENT
Michael Florek

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:
1 año 75€ / 2 años 140€

La suscripción incluye el acceso completo a la hemeroteca digital (todos los números publicados desde 1976).

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

LIBROS

LOS ECOS DEL PROYECTO MANHATTAN

Un repaso a la vida de Roy J. Glauber nos invita a reflexionar sobre la ética de la disuasión nuclear



La última voz
Roy J. Glauber y el inicio de la era atómica
José Ignacio Latorre
M.ª Teresa Soto Sanfiel
Ariel, 2022
272 páginas

En los últimos tiempos, se habla mucho sobre la polarización de los medios de comunicación y las redes sociales [*véase* «La economía de la atención», por Filippo Menczer y Thomas Hills; Investigación y Ciencia, febrero de 2021]. No obstante, cuando los hechos son objetivos, quizá valdría la pena recuperar la metáfora de la bifurcación: la realidad parece bifurcarse siguiendo los designios de un cuento borgiano. Ciertas informaciones salen a la palestra y se ponen de moda, en detrimento de otras, debido a variaciones (mínimas, como en los sistemas caóticos) en las condiciones iniciales del sistema y a su dinámica posterior.

Hallamos un ejemplo de esa bifurcación en el conflicto bélico entre Rusia y Ucrania, activo desde 2014, que se recrudeció el 24 de febrero de 2022 con una ofensiva rusa que buscaba la invasión total del país vecino y el derrocamiento de su Gobierno. Esa contienda sigue causando cientos de víctimas y la mayor crisis de refugiados en el continente europeo desde la Segunda Guerra Mundial. Desde los momentos prebélicos, la retórica propagandística del Kremlin se ha prodigado en amenazas, más o menos veladas, sobre el uso de la bomba atómica como medio de «resolución inmediata» de la guerra y como elemento disuasorio ante las solicitudes de adhesión a la OTAN de países como Suecia o Finlandia. Los viejos fantasmas de la Guerra Fría y los dilemas éticos sobre la proliferación y el control oligopólico de las armas nucleares, perfilados por Amir Aczel en el recorrido histórico y científico de *Las guerras del uranio* (RBA, 2012), han vuelto a saltar a la opinión pública. El desastre nuclear global no parece tan lejano ni tan improbable como hace apenas un año [*véase* «Destrucción, muerte, hambruna e invierno nuclear», por Simone Turchetti; Investigación y Ciencia, abril de 2022]. Una olvidadiza vieja Europa constata ahora el azote cíclico de pandemias y guerras.

Antes de la bifurcación global generada por la guerra de Ucrania, se gestó un libro premonitorio, *La última voz: Roy J. Glauber y el inicio de la era atómica*. Escrito a cuatro manos por José Ignacio Latorre y Maite Soto, es el maravilloso relato de la vida de Roy J. Glauber (1925-2018), galardonado con el premio Nobel de física en 2005 por sus contribuciones al desarrollo de la óptica cuántica.

Como ya recordaba en 2015 el propio Latorre, Glauber fue literalmente «la última voz»: el postrero superviviente del equipo científico que participó en el proyecto Manhattan, en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, donde se desarrollaron las bombas nucleares de Hiroshima y Nagasaki. Precisamente en 2015, Latorre y Soto colaboraron (él como productor y ella como codirectora, junto a Òscar Cusó) en el documental *That's the story: Prof. Roy J. Glauber remembers the making of the atomic bomb*, una entrevista a Glauber aderezada con imágenes inéditas que se acababan de desclasificar.

Pero aunque tengan a su disposición la película, con la voz e imagen de Glauber, no deberían

perderse el libro: las reverberaciones son otras. Latorre y Soto van más allá de la mera transcripción y entretejen una narración intimista que invita a reflexionar. La sensibilidad del relato se constata ya en la introducción: «La verdad está por allí, entre matices, e incluye todos los colores. Por eso vale la pena escuchar al otro. Aquí su testimonio». Porque *La última voz* es un alegato a la escucha, al diálogo y a la resolución pacífica de los conflictos.

Tras un sucinto preámbulo, en el que Glauber explica cómo llegó a Los Álamos con apenas dieciocho años, el libro aborda los entresijos de su vida allí. Se suceden las tramas de espionaje, y aquellas relacionadas con el diseño y la construcción de las armas nucleares. Esas páginas, dignas de una novela, están salpicadas de anécdotas archiconocidas acerca del desarrollo y los ensayos de las bombas, y de los conflictos entre científicos, políticos y militares; pero Glauber también nos deja testimonios únicos sobre temas tan controvertidos como la figura de Oppenheimer [*véase* «J. Robert Oppenheimer», por John S. Rigden; Investigación y Ciencia, septiembre de 1995], el espionaje, o los dilemas éticos asociados a la creación y el uso de las bombas.

Glauber recuerda que, en la «noche de la nieve negra», acaecida del 9 al 10 de marzo de 1945, cayeron sobre Tokio 1665 toneladas de bombas, las cuales causaron más de cien mil muertos y dejaron sin hogar a más de un millón de personas. Científicos y militares suponían que las muertes debidas a las bombas nucleares serían del mismo orden de magnitud que las producidas por los bombardeos masivos habituales. Pero luego estaba la radiación, y sus consecuencias a largo plazo eran un aspecto desconocido y que preocupaba a los investigadores.

En ese sentido, Glauber destaca la figura de Robert Serber, autor de las conferencias que Edward Uhler Condon recogió en 1943 en *The Los Alamos primer*, un documento desclasificado sobre la física de las armas nucleares. Más tarde, Serber sería escogido por Oppenheimer para inspeccionar Hiroshima y Nagasaki después del lanzamiento de las bombas y evaluar su impacto radiactivo y destructivo. Tras la guerra, la maquinaria propagandística estadounidense difundió también el denominado «informe Smyth», en el que Harry Smyth, a petición del general Leslie Groves, desgranaba los fundamentos físicos de las armas que, tan solo unos días antes, habían arrasado las dos urbes japonesas. Por supuesto, no se revelaba ningún elemento clave que pudiera conducir a la construcción de otro artefacto nuclear. ¿Se trataba de informar a las masas mediante aquel «dosier oficial»? No. Se encriptaba científicamente, y se revestía de fórmulas, el dispositivo más terrible jamás inventado. Se aparentaba transparencia científica pero, en realidad, lo que se pretendía era justificar dos actos aterradores. Se desinformaba: ¿aceptaríamos hoy el uso de una bomba nuclear para «acortar» los plazos de una guerra, aduciendo que, de no emplearla, acabaría habiendo más víctimas a causa del fuego tradicional?

Glauber no esconde nada en su voz sosegada por los años, y su testimonio sincero debe contextualizarse en la época en la que sucedieron los hechos. Pormenoriza sin tapujos la compleja posguerra política que sobrevino tras las matanzas nucleares, la caza de brujas (con el juicio a Oppenheimer en el epicentro) y el exitoso espionaje de la Unión Soviética. Glauber no se arredra en ningún momento a la hora de tratar algunas de las polémicas que rodearon su vida, entre las que destacan las acusaciones de plagio que recibió por algunos de sus trabajos. De esta manera, retrata también la competitividad científica: la ágil publicación de las cartas enviadas a revistas especializadas (que precede a la de artículos remitidos antes, pero revisados con mayor lentitud) aún se presta a suspicacias y malentendidos en el seno de la propia comunidad investigadora.

Las reflexiones de Glauber anticipan buena parte de los conflictos actuales entre ciencia, tecnología y sociedad. Como contrapunto divertido a la severidad que rezuma su trayectoria vital, Glauber mostró durante años su peculiar sentido del humor en la ceremonia de entrega de los célebres premios Ig Nobel, en la que (animado por Marc Abrahams) fue un fiel participante. Soto y Latorre desgajan, además, otras jugosas anécdotas sobre su vida personal y su último noviazgo octogenario.

Glauber era un físico muy joven cuando se incorporó al proyecto Manhattan. Formaba parte de un contingente que no tomaba decisiones, pero que intervino de forma activa en aquella maquinaria bélica. Su hálito sobrevuela esta nueva era de disuasión nuclear. Recojan los papelitos de Fermi, déjenlos caer y estimen la energía de lo que se avecina.

Antoni Hernández-Fernández
Universidad Politécnica de Cataluña